



Hugo Coelho Fernandes

Licenciado em Engenharia de Materiais

Optimização térmica de um sistema de concentração solar fotovoltaico

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia de Materiais

Orientador: Eng. Daniel Henrique Jácome de Azevedo Costa
Co-orientador: Professora Doutora Isabel Maria das Mercês Ferreira

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Paulo Ribeiro Miranda Borges
Arguente: Professor Doutor Hugo Manuel Brito Águas
Vogais: Eng. Daniel Henrique Jácome de Azevedo Costa
Professora Doutora Isabel Maria das Mercês Ferreira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2011

Optimização térmica de um sistema de concentração solar fotovoltaico

Copyright © Hugo Coelho Fernandes, 2011

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à Prof. Doutora Isabel Ferreira pela disponibilidade, apoio e ajuda durante a execução deste trabalho.

Gostaria também de agradecer ao Eng. Daniel Costa pelos conselhos e por ter mostrado um pouco da realidade do que é ser engenheiro.

Agradeço também à Prof. Doutora Elvira Fortunato e ao Prof. Doutor Rodrigo Martins por terem permitido a utilização dos meios disponíveis no CENIMAT/I3N e no CEMOP durante a realização deste trabalho.

Tenho também que agradecer a todas as pessoas que, duma forma ou de outra me ajudaram durante as experiências realizadas. Agradeço ao Salomão Lopes pela amizade demonstrada e pela ajuda durante a construção do protótipo termo fotovoltaico. Agradeço também aos técnicos do CEMOP, Ricardo Ferreira e Eli Botelho pela ajuda e conselhos. Agradeço também às engenheiras Sónia Pereira, Alexandra Gonçalves e à mestre Andreia Lopes pela disponibilidade e ajuda durante as experiências com aluminotermia. Agradeço ainda ao Prof. Doutor Francisco Fernandes e à Prof. Doutora Rosa Miranda pela ajuda com as questões relacionadas com soldadura. Agradeço também aos funcionários da Magpower pela ajuda e disponibilidade demonstrada.

A título pessoal gostaria de agradecer a todos os meus amigos pelo apoio demonstrado, pela paciência para os meus queixumes, ajuda, amizade, companhia e por estarem sempre comigo. Se não fossem os cafezinhos e as jantaradas seria difícil manter a sanidade mental. Agradeço em particular ao Rafael Santos pela ajuda, camaradagem e pelas sessões de “brainstorming” que se revelaram muito importantes para este trabalho.

Agradeço ainda à minha namorada, Ana Vitorino, todo o apoio, força, ajuda e amor que me deu ao longo deste trabalho. A sua companhia tornou mais fácil ultrapassar as adversidades encontradas.

Deixo ainda um agradecimento especial à minha mãe, Ana Santos, por me ter permitido e incentivado a estudar e por todo o amor e apoio que me deu. A ela dedico este trabalho.

Finalmente, agradeço a todos os que de uma forma ou de outra, contribuíram para este trabalho e que não mencionei particularmente.

Um muito obrigado a todos.

Resumo

Este trabalho consistiu na optimização de um sistema CPV (Concentrated Solar Photovoltaics) produzido pela empresa Magpower SA. Para tal, foi caracterizada termicamente parte do sistema CPV recorrendo a uma câmara térmica (caracterização por termografia) em que foram estudados em laboratório alguns parâmetros como a inclinação do CPV e a presença ou não de vento.

Criou-se também um modelo matemático simples, de modo a prever o desempenho térmico do CPV com as diversas alterações sugeridas. Foram ainda idealizados processos de união da placa de circuito ao dissipador, para aumentar a resistência do CPV à fadiga térmica e melhorar a dissipação de calor.

Por fim, foi projectado um protótipo termo-fotovoltaico com vista à maximização da eficiência do sistema, através da recuperação da energia perdida sob a forma de calor.

Palavras-chave: Calor, Térmica, Concentrador, fotovoltaico, Dissipação, Aproveitamento.

Abstract

This work consisted in optimizing a CPV system (Concentrated Solar Photovoltaics) produced by Magpower SA. For such it was thermally characterized part of the CPV system using a thermal camera (thermography characterization). This characterization was carried out in the laboratory, and parameters such as the slope of the CPV and the presence or absence of wind were tested.

A simple mathematical model was also created, in order to predict the thermal performance of the CPV with the various suggested changes. Processes were also idealized to achieve union of the receiver to the sink, to increase resistance to thermal fatigue of the CPV and improve heat dissipation.

Finally, a thermo-photovoltaic prototype was designed to maximize system efficiency by recovering energy lost as heat.

Keywords: Heat, Thermal, Concentrator, Photovoltaic, Dissipation, Recovering.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Índice de figuras	ix
Índice de tabelas	xi
1. Objectivos.....	1
2. Introdução	3
2.1. Estado da arte dos CPV	3
2.2. Constituição do sistema	3
2.3. Dissipação de calor	7
2.4. Propriedades térmicas dos materiais	9
2.5. Características térmicas dos CPV	9
2.5.1. Eficiência dos sistemas CPV	10
2.6. Constituição do sistema	11
2.7. Aproveitamento e conversão de calor	12
3. Caracterização térmica do sistema CPV produzido pela Magpower	15
3.1. Determinação do tempo de estabilização da temperatura da célula	16
3.2. Variação da temperatura com a potência aplicada	18
3.3. Influência do encapsulamento.....	18
3.4. Influência do posicionamento do CPV	19
3.4.1. Caracterização dos CPV sem ângulo.....	20
3.4.2. Caracterização dos CPV com ângulo de 45°C	21
3.5. Influências da velocidade do vento	23
4. Optimização do sistema	25
4.1. Modelação térmica	25
4.1.1. Dedução da expressão.....	25
4.2. Alterações propostas ao CPV actual.....	30
5. Melhoramentos estruturais.....	37
5.1. Brasagem utilizando reacções químicas exotérmicas	37
5.1.1. Experiência de soldadura utilizando aluminotermia	38
5.2. Processos de soldadura	41
6. Protótipo termo fotovoltaico	43
6.1. Protótipo idealizado	43
6.1.1. Estimativas para o protótipo idealizado	44
6.2. Protótipo construído	46
6.2.1. Construção do protótipo	46
6.2.2. Resultados em funcionamento simulado	49
7. Discussão de resultados e perspectivas futuras.....	51
7.1. Parâmetros em estudo	51
7.2. Modelo e Melhorias	51

7.3.	Protótipo	52
7.3.1.	CPV idealizado	52
7.3.2.	- Custos dos <i>heat pipes</i> e do dispositivo termoelectricoCPV construído.....	52
7.4.	Perspectivas futuras	53
8.	Conclusões.....	55
9.	Bibliografia.....	57
Anexos.....		59

Índice de figuras

Figura 2.1 – Quinta solar utilizando CPVs. É de notar o tamanho dos módulos, que são pouco adequados para utilização doméstica [2].	3
Figura 2.2 - Constituição do sistema de concentração utilizado nos CPVs da Magpower, em que 1 – lente de Fresnel, 2 - prisma, 3 – célula fotovoltaica, 4 e 5 elementos de acoplamento térmico e 6 – dissipador.	4
Figura 2.3 – Detalhes do sistema de dissipação de calor da célula solar e elementos constituintes da montagem.	5
Figura 2.4 – Estrutura de uma célula solar multi-junção monolítica, as junções estão dispostas por ordem decrescente do valor de hiato óptico, de modo a que a radiação menos energética possa passar à junção seguinte [1].	6
Figura 2.5 - Espectro solar e as diferentes partes do espectro aproveitadas pelas diferentes junções [6].	6
Figura 2.6 – Comparativo entre a eficiência das células de silício e das células multijunção de arseneto de gálio e germânio para vários rácios de concentração.	7
Figura 2.7 – Tempo de vida das células multijunção em função da temperatura [9].	7
Figura 2.8 – Interface de duas superfícies e condução térmica através da mesma [11].	8
Figura 2.9 – Eficiência em função do rácio de concentração e temperatura de funcionamento [18].	10
Figura 2.10 – Vista em corte do sistema em estudo. Esta é uma representação esquemática do sistema descrito na Figura 2.3.	11
Figura 2.11 – Representação do fluxo de calor e resistividade térmica no sistema em estudo.	12
Figura 2.12 – Constituição de um dispositivo termoelétrico, Podem observar-se duas configurações, uma de baixa condutividade térmica (a) e uma de mais alta condutividade térmica (b) [20].	14
Figura 3.1 - Termografia de uma amostra. A potência aplicada durante a captura desta imagem foi de 100W e a temperatura ambiente cerca de 27°C.	15
Figura 3.2 – Montagem experimental utilizada para a caracterização térmica.	16
Figura 3.3 – Célula ligada em polarização directa. É possível observar que a célula emite uma luz avermelhada.	16
Figura 3.4 – Termografia da amostra utilizada. A potência aplicada durante a captura desta imagem era de 100W e a temperatura ambiente de 24°C.	17
Figura 3.5 – Variação da temperatura com o tempo para uma potência de 100W aplicados à célula.	17
Figura 3.6 – Resultados do primeiro ensaio.	18
Figura 3.7 – Comparativo entre a célula com prisma, encapsulada e sem prisma nem encapsulamento.	19
Figura 3.8 - ΔT vs. Tempo e Potência vs. Tempo para várias amostras, sem ângulo no CPV.	20
Figura 3.9 - ΔT vs tempo e Potência vs tempo para várias amostras com inclinação de 45°. A amostra E não foi incluída porque deixou de funcionar.	22
Figura 3.10 – Direcção do vento. A ventoinha situa-se a cerca de 15cm do CPV	23
Figura 3.11 - ΔT vs tempo e Potência vs tempo para várias amostras com inclinação de 45° e vento com velocidade entre os 3 e os 4 km/h. Neste ensaio a amostra E foi substituída pela amostra F porque sofreu uma falha eléctrica. A amostra B sofreu uma anomalia durante o ensaio e por isso não foi incluída.	24
Figura 4.1 – Dados teóricos e dados experimentais em função da potência da célula.	28
Figura 4.2 - ΔT vs tempo e Potência vs tempo para várias amostras e temperatura prevista pelo modelo teórico.	28
Figura 4.3 – Comparativo entre a temperatura média das amostras e a temperatura prevista.	29

Figura 4.4 – Comparativo entre o desempenho do CPV actual com o desempenho de um CPV alterado. Nesta alteração, o material cerâmico seria substituído por nitreto de alumínio, com uma condutividade térmica mínima de 140 W/m.K (nitreto de alumínio <i>low grade</i>).	31
Figura 4.5 - Comparativo entre o desempenho do CPV actual com o desempenho de um CPV alterado.	32
Figura 4.6 - Comparativo entre o desempenho do CPV actual com o desempenho de um CPV alterado.	33
Figura 5.1 – Representação esquemática do andamento da reacção exotérmica. Após a ignição, a reacção propaga-se ao longo da lâmina formando um composto intermetálico [28].	38
Figura 5.2 – Aspecto do produto de reacção da amostra A.	39
Figura 5.3 – Aspecto do produto de reacção da amostra C. É possível observar uma zona branca, correspondente ao óxido de magnésio formado na combustão do magnésio.	40
Figura 5.4 - Componentes após tentativa de soldadura. É possível ver que a placa de circuitos ficou completamente inutilizada. Na face da placa de circuitos é visível que a metalização fundiu e que a reacção foi incompleta, devido à presença de material de brasagem não fundido.	40
Figura 6.1 - Aspecto geral da integração do protótipo no sistema de concentração.	43
Figura 6.2 – Constituição do sistema idealizado.	44
Figura 6.3 - Esquema representativo do fluxo de calor e a resistividade oferecida pelos diferentes componentes.	45
Figura 6.4 – Placa de arrefecimento em construção. Ambas as faces que estarão em contacto com a tubagem foram revestidas com massa térmica, para garantir um fluxo de calor elevado e uniforme..	47
Figura 6.5 – Placa de arrefecimento. São visíveis os tubos por onde irá passar o líquido refrigerante.	47
Figura 6.6 – Placa de arrefecimento acoplada ao termoelétrico e ao dissipador. Entre cada um dos componentes foi colocada massa térmica, de modo a maximizar o fluxo de calor. A união destes componentes foi feita através da utilização de abraçadeiras de serrilha.	48
Figura 6.7 – Protótipo em funcionamento.	48
Figura 6.8 – Protótipo com circuito de refrigeração. Ao centro pode observar-se o reservatório de água.	49
Figura 6.9 - Protótipo a funcionar com uma potência injectada de 160W. A potência a dissipar sob a forma de calor corresponderá a cerca de 126W.	50

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades térmicas e dimensões dos materiais que constituem o sistema	12
Tabela 3.1 – Diferença entre as temperaturas medidas para os três cenários.	19
Tabela 3.2 – Resultados e estatística das amostras em estudo.....	21
Tabela 3.3 – Diferença entre os valores registados para uma inclinação de 0° e 45°.	22
Tabela 3.4 – Diferença entre a temperatura dos CPV com e sem vento.	24
Tabela 4.1 – Valores de h	26
Tabela 4.2 – Potência dissipada sob a forma de calor.	27
Tabela 4.3 – Comparativo entre os valores teóricos e os valores experimentais.....	27
Tabela 4.4 – Resultados obtidos e resultados previstos.....	30
Tabela 4.5 - Variação de temperatura no sistema, para as várias alterações.....	34
Tabela 4.6 – Cálculo da potência térmica máxima a que o CPV vai estar sujeito.....	34
Tabela 4.7 – Cálculo da resistividade térmica total do sistema actual e das alterações propostas.	34
Tabela 4.8 – Temperaturas máximas da célula estimadas para uma temperatura ambiente de 40°C.	35
Tabela 5.1 – Percentagem de agente retardante na mistura de termite.	39
Tabela 6.1 – Dimensões, condutividade e resistividade térmicas dos diferentes constituintes do sistema.	45
Tabela 6.2 - Resistividade térmica total até aos dissipadores.	45
Tabela 6.3 - Variação de temperatura estimada versus dados experimentais.	46
Tabela 6.4 – Temperatura atingida pela célula versus a potência a dissipar.	49
Tabela 6.5 – Resultados obtidos durante o funcionamento do dispositivo termoeléctrico	50

1. Objectivos

Este trabalho tem como objectivos principais a caracterização e optimização térmicas de um sistema CPV constituído por células dispostas individualmente produzido pela Magpower. A caracterização térmica foi realizada utilizando a técnica de termografia enquanto a optimização térmica do sistema consistiu e estudar diferentes formas de aproveitamento do calor gerado durante a operação do mesmo.

Não sendo um objectivo inicial, durante a execução deste trabalho abordou-se também a hipótese de realizar melhorias na estrutura de montagem/ligação da célula ao dissipador, nomeadamente a brasagem da placa de circuitos ao dissipador de modo a melhorar as propriedades térmicas e mecânicas da interface dissipador /placa de circuitos.

2. Introdução

A ideia base por detrás dos sistemas CPV é utilizar um sistema de lentes e/ou espelhos, para concentrar a radiação solar que incide numa determinada área, numa célula solar de menor área. O objectivo desta ideia é reduzir a quantidade de material semiconductor a utilizar, com vista a diminuir o custo da energia fotovoltaica [1].

Esta ideia foi aprofundada nos anos 70, durante a crise petrolífera, em que a energia solar era vista como uma das formas de eliminar a dependência do petróleo[1]. No entanto, após ser superada a crise petrolífera, o interesse na tecnologia fotovoltaica diminuiu levando a que o desenvolvimento desta abrandasse.

Este abrandamento foi particularmente significativo na indústria de CPV, pelo que só há poucos anos estes sistemas começaram a ser produzidos industrialmente. A diferença na velocidade de evolução da tecnologia fotovoltaica e a tecnologia de concentradores fotovoltaicos, deveu-se em grande parte à utilização da energia fotovoltaica em aplicações domésticas e pequenos sistemas autónomos, onde a utilização de CPVs não é prática (pelo menos com a tecnologia actual) [1]. Uma imagem de um conjunto de CPVs numa quinta solar pode ser vista na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Quinta solar utilizando CPVs. É de notar o tamanho dos módulos, que são pouco adequados para utilização doméstica [2].

2.1. Estado da arte dos CPV

Os CPV apresentam-se como uma alternativa mais barata relativamente à tecnologia fotovoltaica baseada no silício. Para tal utilizam sistemas de concentração da luz de modo a reduzir a área de material semiconductor necessário, como já referido. Os CPV podem ser divididos consoante a sua capacidade de concentração da radiação incidente, em que o número de vezes que a luz é concentrada é chamada de número de sóis [3] sendo que um sol corresponde à potência máxima que atinge a superfície terrestre, nomeadamente 1000 W/m^2 . Os sistemas de baixa concentração proporcionam uma concentração até 40 sóis, os sistemas de concentração média entre 40 e 300 sóis e os sistemas de alta concentração de 300 sóis a 2000 sóis [3]. Os CPV produzidos pela MagPower inserem-se na categoria de alta concentração.

Actualmente os sistemas que apresentam maior interesse são os sistemas de alta concentração, pois são os sistemas com maior número de investidores, têm maior potência instalada, melhores perspectivas de redução de custos e apresentam um potencial de aumento de eficiência a curto/médio prazo [3].

Estima-se que eficiência dos módulos disponíveis no mercado se situe entre os 20% e os 30% e que a eficiência dos sistemas se situe nos 20%. Segundo Pérez-Higueras *et al*, prevêem-se melhorias a nível de eficiência e uma queda dos custos a curto prazo, pelo que esta tecnologia poderá constituir uma alternativa aos painéis fotovoltaicos planos a curto prazo.

2.2. Constituição do sistema

A constituição típica dos CPVs consiste num grupo de células dispostas em grupo, fileiras ou individualmente, óptica primária, opcionalmente óptica secundária e componentes do invólucro para concentrar a luz [3]. Por este motivo, o seu aspecto pode variar dependendo do sistema óptico de concentração. Os principais sistemas de concentração são, de acordo com Clive *et al* [4]:

- Concentrador parabólico
- Concentrador hiperbólico
- Concentrador de lentes de Fresnel
- Concentrador parabólico composto
- Concentrador por reflexão total interna
- Concentrador *Flat High*
- Concentrador por *quantum dots*

As células utilizadas nestes sistemas podem também dividir-se, neste caso em dois tipos: de silício mono cristalino e células multi-junção, sendo as células multi-junção as mais eficientes. A produção em massa das células multi-junção de arseneto de gálio ainda está numa fase inicial, ao contrário das células de silício, mas estão a ser alvo de um grande esforço de modo a que estas se tornem cada vez mais eficientes e competitivas economicamente. Em Agosto de 2009, células de tripla junção de arseneto de gálio e germânio fabricadas pela Spectrolab registaram uma eficiência recorde de 41,6% sob iluminação de 364 sóis, o que ultrapassa em muito a eficiência registada pelas células de silício, que se situa abaixo dos 30% [3].

No caso concreto dos CPVs construídos na Magpower SA, o sistema de concentração é constituído por lentes de Fresnel e um prisma. As lentes de Fresnel funcionam de modo semelhante às lentes convencionais, refractando a luz e focando-a num ponto. Estas lentes são normalmente constituídas por duas secções: uma superfície lisa e uma superfície com sulcos concêntricos. O objectivo destes sulcos é provocar o efeito de refacção e concentração da luz, que acontece nas lentes comuns [4]. Os prismas, têm o objectivo de focar a radiação na área da célula. A constituição geral do sistema de concentração encontra-se ilustrada na Figura 2.2.

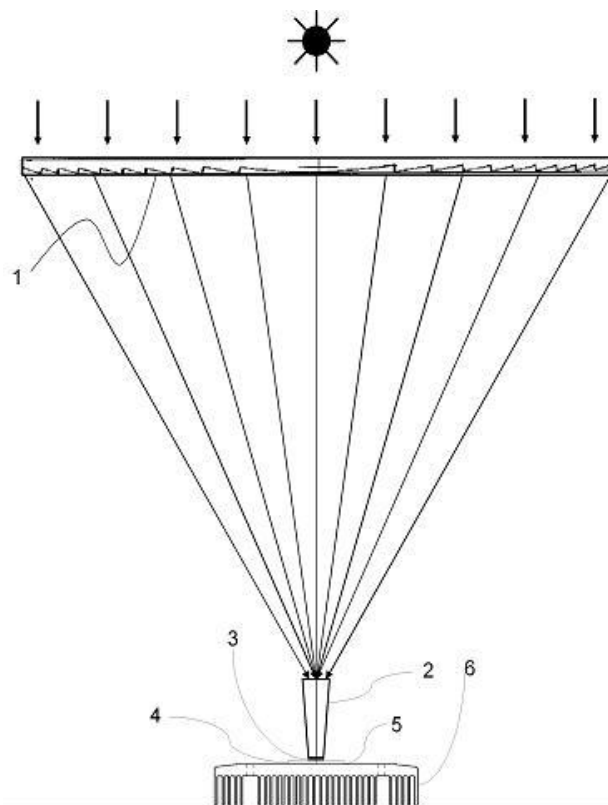


Figura 2.2 - Constituição do sistema de concentração utilizado nos CPVs da Magpower, em que 1 – lente de Fresnel, 2 - prisma, 3 – célula fotovoltaica, 4 e 5 elementos de acoplamento térmico e 6 – dissipador.

A vantagem das lentes de Fresnel em relação às lentes convencionais está relacionada com a sua menor espessura e a utilização de menos material para o seu fabrico. No entanto, a precisão dimensional que os sulcos devem apresentar pode ser considerada uma desvantagem, pois aumenta a complexidade de fabrico [4].

O estudo efectuado neste trabalho irá incidir sobre o sistema em que a célula solar se encontra inserida, porque é na célula solar que a quase totalidade da radiação irá incidir, conduzindo ao

aumento de temperatura da célula e da sua vizinhança. Na Figura 2.3 apresenta-se ilustrada a constituição detalhada do sistema a ser estudado.

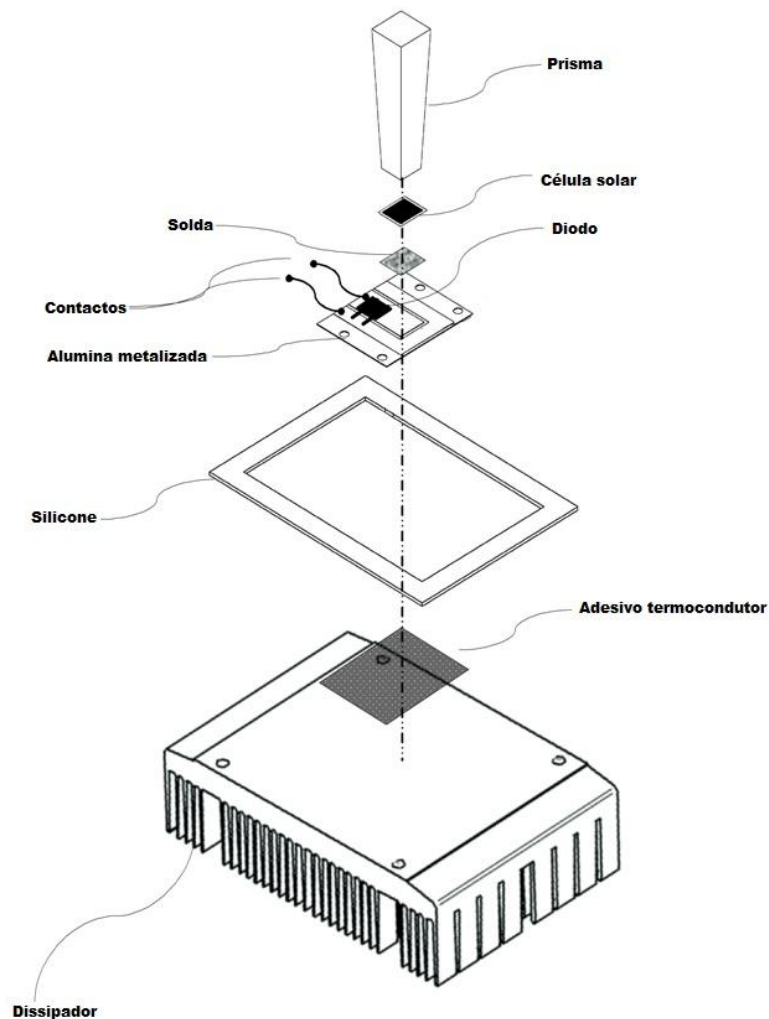


Figura 2.3 – Detalhes do sistema de dissipação de calor da célula solar e elementos constituintes da montagem.

O prisma é um elemento óptico secundário que tem como função focar a luz incidente. Este é colocado em último lugar e encontra-se acoplado à célula através de um adesivo de silicone.

A célula, por sua vez, é acoplada à placa de circuito através de um processo de brasagem, usando para tal uma liga de estanho e prata. Esta junção corresponde também ao contacto posterior da célula. Os contactos frontais são feitos por micro soldadura termosónica utilizando fita de ouro como elemento de ligação aos contactos.

A placa de circuito consiste numa lamela de alumina metalizada de ambos os lados por cobre, em que num dos lados são definidos os contactos, posteriormente é depositada uma fina camada de ouro para proteger a superfície do cobre. Por fim são acrescentados os contactos para ligação

externa e um diodo de *bypass* para garantir que o sistema funciona quando uma célula está inoperacional ou existe sombra sobre essa célula.

A placa de circuito está unida ao dissipador através de um adesivo termocondutor de modo a garantir o fluxo de calor e a resistência mecânica do conjunto.

A junta de silicone serve para selar a placa de circuito quando o dissipador é fixado ao invólucro do sistema.

A célula fotovoltaica multi-junção utilizada é constituída por materiais dos grupos III-V depositados sobre um substrato de germânio. É constituída por 3 camadas sobrepostas, uma de GaInP, outra de GaAs e outra de Ge, em que o germânio desempenha também o papel de substrato, como ilustrado na Figura 2.4. Os diodos de tunelamento entre cada camada servem para evitar a recombinação de cargas.

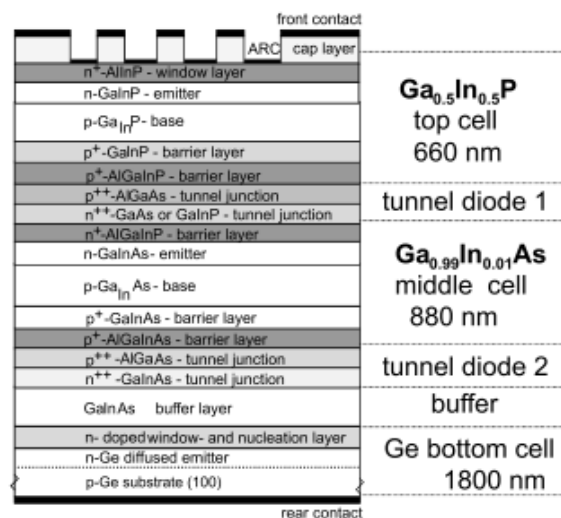


Figura 2.4 – Estrutura de uma célula solar multi-junção monolítica, as junções estão dispostas por ordem decrescente do valor de hiato óptico, de modo a que a radiação menos energética possa passar à junção seguinte [1].

As diferentes junções aproveitam diferentes comprimentos de onda, aumentando assim o rendimento das células [5]. Na Figura 2.5 é possível observar o espectro de radiação solar e os comprimentos de onda aproveitados pela célula solar.

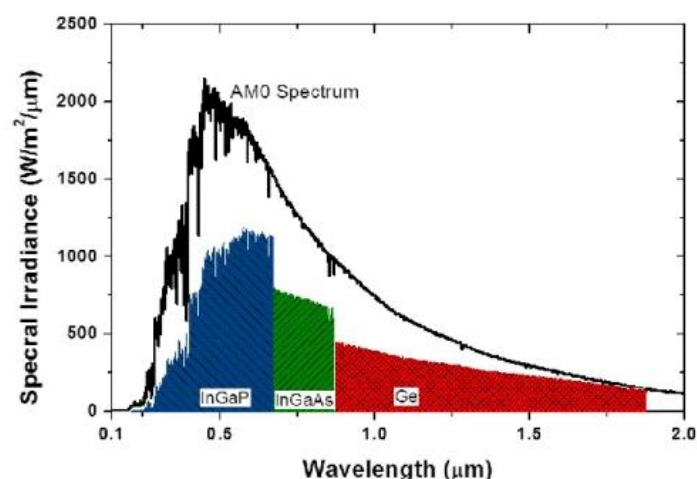


Figura 2.5 - Espectro solar e as diferentes partes do espectro aproveitadas pelas diferentes junções [6].

Estas células apresentam a maior eficiência de conversão entre os vários dispositivos fotovoltaicos, cerca de 39% [1] para dispositivos disponíveis comercialmente e espera-se que a sua eficiência de conversão aumente num futuro próximo. A sua utilização em grandes áreas é limitada pelo seu custo,

pelo que a solução encontrada foi utilizá-las em sistemas de concentração, substituindo o uso de grandes áreas pelo uso de sistemas ópticos, mais baratos [1]. Além da sua elevada eficiência, estas células não apresentam uma degradação das propriedades eléctricas com a temperatura tão acentuada como os dispositivos de silício, o que as torna ideais para aplicação em sistemas CPV.

Na Figura 2.6 é possível observar um comparativo entre a eficiência das células de silício e das células multijunção de arseneto de gálio e germânio para vários rácios de concentração. A eficiência das células de silício começa a decair para rácios de 100x, enquanto a eficiência das células multijunção só começa a decrescer a partir das 800x

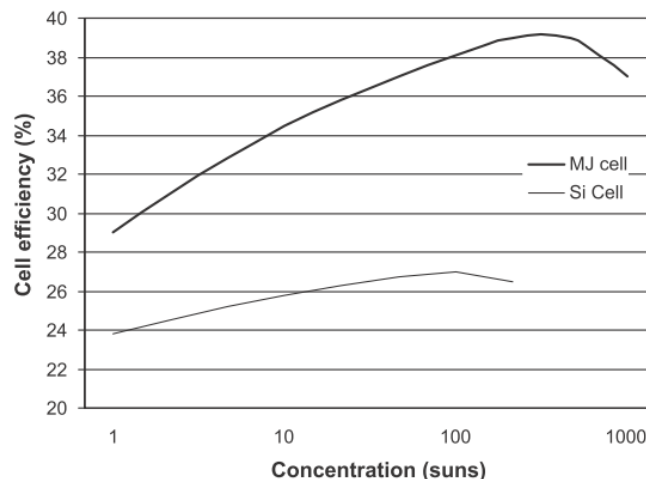


Figura 2.6 – Comparativo entre a eficiência das células de silício e das células multijunção de arseneto de gálio e germânio para vários rácios de concentração [3] .

A corrente gerada pelas células multijunção é proporcional à irradiância na sua superfície e a tensão gerada aumenta logaritmicamente com o rácio de concentração, aumentando também a eficiência da célula. No entanto, este acréscimo na eficiência diminui para maiores rácios de concentração, devido ao aumento da resistência em série e outras perdas devidas à elevada densidade de corrente gerada. O principal factor de perda de eficiência de uma célula é o aumento da temperatura, que causa uma diminuição da tensão de circuito aberto e consequentemente uma diminuição na potência produzida [7]. A dissipação do calor gerado nos dispositivos concentradores fotovoltaicos torna-se por isso um assunto importante, quer pela eficiência, como já referido, quer pela fiabilidade do sistema, pois temperaturas elevadas diminuem o tempo de vida útil da célula [8]. Na Figura 2.7 é possível observar a relação do tempo de vida da célula com a temperatura a que esta se encontra.

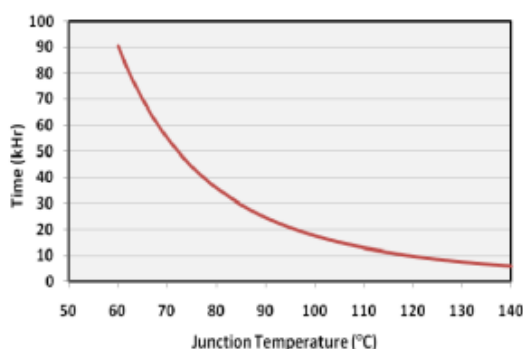


Figura 2.7 – Tempo de vida das células multijunção em função da temperatura [9].

2.3. Dissipação de calor

Antes de passar ao problema da dissipação de calor no sistema em estudo, é importante relembrar alguns conceitos teóricos e grandezas associadas à transferência de calor.

Existem três tipos primários de **transferência** de calor: por **condução**, por **convecção** e por **radiação** [10]. Na transferência por condução, o calor pode propagar-se de duas formas: através de

fonões (vibrações na rede cristalina) e nos materiais condutores eléctricos pode também propagar-se através dos electrões.

A transferência de calor por condução térmica é descrita através da lei de Fourier [10]:

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (1)$$

Ou para uma dada direcção no espaço por:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Em que k representa a condutividade térmica do material e $\frac{dT}{dx}$ o gradiente de temperatura a que está sujeito.

Na transferência por convecção, o calor propaga-se devido ao movimento de um ou mais fluidos que em contacto com um corpo a uma determinada temperatura lhe retiram calor. Uma expressão relativa a um caso estacionário (temperatura constante no corpo) da lei do arrefecimento de Newton, que constitui uma aproximação simples a esta problemática é apresentada a seguir [10]:

$$\frac{Q}{A} = \bar{h}(T_c - T_a) \quad (3)$$

Em que T_c é a temperatura do corpo, T_a a temperatura do meio e \bar{h} o coeficiente de transferência térmica médio.

Na transferência por radiação, um corpo vai libertar calor sob a forma de radiação electromagnética, que será tanto mais energética quanto a temperatura a que o corpo se encontra [10]. O fluxo de energia radiada por um corpo negro pode ser obtido através da lei de Stefan-Boltzmann, apresentada em seguida [10]:

$$e(T) = \sigma T^4 \quad (4)$$

Em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T a temperatura absoluta do corpo.

Importa ainda definir a *resistividade térmica*, que consiste na capacidade de um material ou meio se opor á transferência de calor, e a *condutividade térmica* (inversa da resistividade) que consiste na capacidade que um material ou meio tem de conduzir calor [10]. É também importante abordar a resistência de contacto entre duas superfícies. Duas superfícies sólidas quando pressionadas uma contra a outra nunca formam uma superfície de contacto completamente regular, como ilustrado na Figura 2.8.

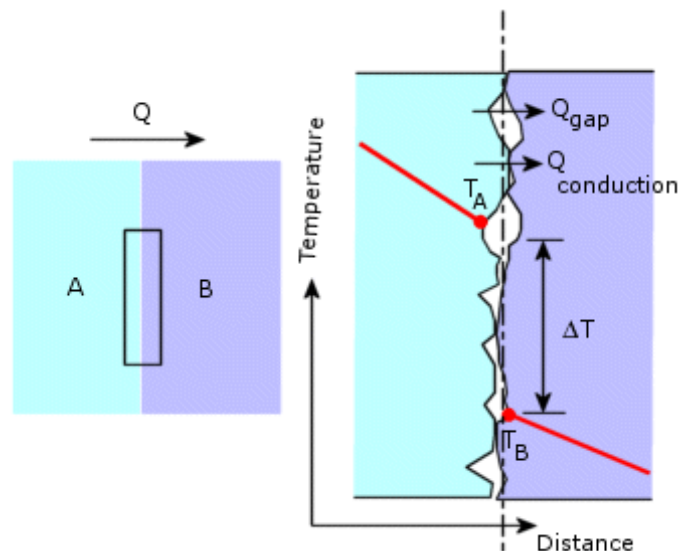


Figura 2.8 – Interface de duas superfícies e condução térmica através da mesma [11].

A condução térmica acontece nas zonas em que as duas superfícies se encontram em contacto (condução rápida) e nos interstícios entre as superfícies (condução lenta). Esta zona terá portanto uma condutividade térmica própria, que depende da rugosidade de ambas as superfícies.

A potência que a célula vai dissipar sob a forma de calor durante o seu funcionamento vai ser um factor importante a ter em conta quando se idealiza o sistema em que esta vai estar inserida. A temperatura a que a célula vai operar, vai depender directamente da potência que não é convertida em energia eléctrica (potência térmica). Segundo Chiang *et al* [12], quando o efeito da temperatura é o factor dominante na eficiência da célula, a potência dissipada sob a forma de calor pode ser calculada recorrendo à seguinte expressão:

$$P_{dissipada} \approx P_{total} \times \beta \times A_{célula} \times (100 - \eta) \quad (5)$$

Em que β é o rácio de concentração, P_{total} é a irradiância solar, $A_{célula}$ a área da célula solar e η a eficiência do CPV (esta inclui a eficiência da célula e dos componentes ópticos que o constituem, ver 2.5.1).

2.4. Propriedades térmicas dos materiais.

Como já referido, a condução de calor nos diferentes materiais pode dar-se através de fonões e electrões, caso sejam materiais condutores ou exclusivamente por fonões caso sejam materiais isolantes. No caso dos materiais metálicos os electrões são os principais responsáveis pelo transporte de calor [13], já nos cerâmicos são os fonões. No entanto vários factores para além da capacidade de condução eléctrica afectam a condutividade térmica de um material: o grau de cristalinidade, o tamanho de grão, a presença de elementos de liga, possíveis tratamentos mecânicos ou térmicos que tenham alterado a sua estrutura, estrutura cristalina, elementos constituintes entre outros.

O calor específico de um determinado material é uma propriedade intrínseca do mesmo e consiste na quantidade de energia necessária por unidade de massa para elevar 1°C a sua temperatura. O calor específico pode ser definido através da seguinte expressão [14]:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (6)$$

O calor específico é uma característica importante, pois indica a inércia térmica de um determinado material e a capacidade de armazenar energia sob a forma de calor [14].

A expansão (ou por vezes contracção) térmica consiste na variação das dimensões de um corpo, consoante a variação da temperatura, e varia de material para material. É especialmente importante quando existe uma junção com materiais diferentes porque se os coeficientes de expansão térmica destes forem muito diferentes, a diferença nas alterações dimensionais pode levar à criação de tensões na junta que podem levar à quebra da mesma. Este fenómeno pode não ser visível de imediato, mas se ocorrer após longos períodos de variação térmica leva à falha da junta por fadiga. O coeficiente de expansão térmica segundo uma dada direcção pode ser definido por [14]:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{\Delta T \times L_i} \quad (7)$$

Em que ΔL é a variação do comprimento, L_i a dimensão inicial e ΔT a variação de temperatura. É de notar que em materiais anisotrópicos este coeficiente pode ter valores diferentes consoante a direcção considerada.

A placa de circuito, devido a ser constituída por materiais dissimilares e com coeficientes de expansão térmica diferentes (como será explicado mais adiante), está sujeita a tensões de origem térmica que podem levar à falha por fadiga térmica. Os principais problemas observados após os ciclos térmicos são fissuras no cerâmico e delaminação da metalização do cerâmico, que acontecem devido à degradação sofrida na interface metal/cerâmico [15].

A degradação das interfaces é um dos pontos críticos quer a nível mecânico, quer a nível térmico pois a descoesão dos diferentes componentes aumenta a resistividade térmica do sistema e consequentemente a temperatura máxima atingida podendo provocar a destruição do sistema.

2.5. Características térmicas dos CPV

A transferência de calor na indústria de concentradores fotovoltaicos tem sido alvo de alguns estudos, como efectuado por Royne A. *et al* [8] em que o autor faz uma revisão sobre o arrefecimento dos sistemas CPV. Nesta revisão aborda-se a questão da dissipação de calor para várias disposições das células no sistema (individuais, em fileiras ou agrupadas densamente). O autor refere que para uma concentração até 1000 sóis, o arrefecimento passivo funciona bem em sistemas com células

individuais, e que esta é a solução mais económica para células individuais em que a lente de concentração possui um diâmetro menor do que 30 cm. Para um diâmetro de lente de cerca de 30 cm o custo do arrefecimento passivo e activo é semelhante. O autor refere ainda que o arrefecimento passivo apresenta como limitações a resistência térmica dos diferentes constituintes e a transferência de calor para o meio ambiente por parte do dissipador [8].

Kenji Araki *et al.* [16] descrevem um estudo mais focado em testes práticos em que é utilizado como dissipador uma simples placa de alumínio, no arrefecimento de um CPV com 500 sóis de concentração. Os resultados apresentados pelo autor referem que com esta placa de alumínio a actuar como dissipador, em que o principal mecanismo de dissipação seria a radiação do calor, a célula mantém uma temperatura cerca de 20°C acima da temperatura ambiente [16].

Existem também alguns modelos relativos a esta problemática descritos na literatura, por exemplo o efectuado por Sun J. *et al* [17], utilizando software comercial e um modelo criado pelos mesmos de modo a prever o comportamento teórico do sistema. Os resultados são depois comparados com os resultados práticos de modo a avaliar os diferentes modelos e a conhecer a sua incerteza. Os autores concluem depois que o sistema idealizado atinge temperaturas inferiores a 80°C, que o vento é um parâmetro influente e que a condutividade térmica do adesivo que liga a célula à placa de circuitos deve ser pelo menos de 20 W/m.K [17].

Na Figura 2.9 pode observar-se a eficiência da célula para várias temperaturas e rácios de concentração. Analisando a figura, é possível observar que para um rácio de concentração de 800x (utilizado no sistema em estudo) a perda de eficiência é cerca de 0,05%/°C

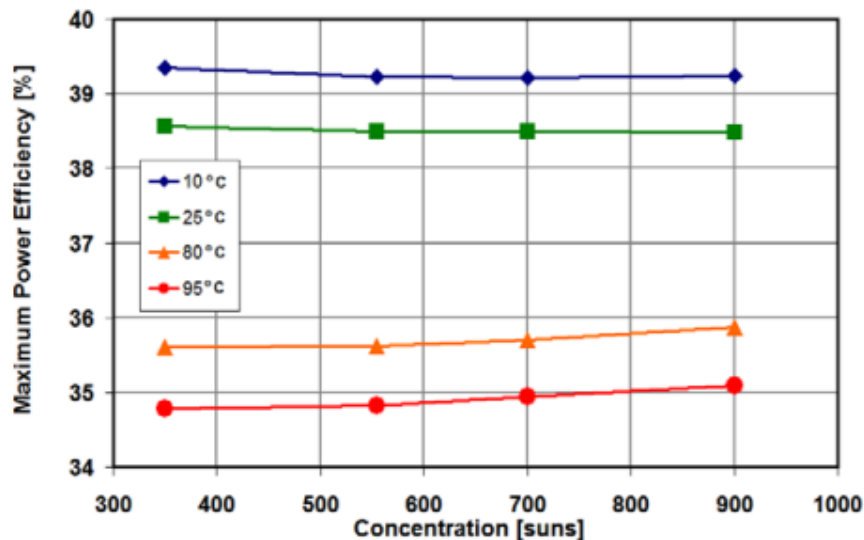


Figura 2.9 – Eficiência em função do rácio de concentração e temperatura de funcionamento [18].

2.5.1. Eficiência dos sistemas CPV

A eficiência dos sistemas CPV depende de vários factores como a eficiência dos sistemas ópticos e a temperatura de funcionamento da célula. A temperatura é um dos principais parâmetros que influenciam a eficiência da célula. A expressão que relaciona a eficiência de uma célula com a sua temperatura é a seguinte:

$$\eta_c = \eta_0 - \beta(T_c - T_{ref}) \quad (8)$$

Em que η_0 é a eficiência da célula a uma temperatura de referência, T_c é a temperatura da célula, T_{ref} é a temperatura de referência e β o coeficiente de variação da eficiência com a temperatura[3].

A eficiência de um módulo CPV pode ser definida à custa da eficiência da célula, como na expressão seguinte:

$$\eta_{modulo} = \eta_c \times \eta_{op} \times (1 - Pp) \quad (9)$$

Em que η_{op} é a eficiência do sistema óptico, e Pp corresponde a outras perdas (ligações eléctricas, etc.). Também pode ser definida a partir da potência produzida (P), a área do módulo (A) e a irradiância (G) [3].

$$\eta_{modulo} = \frac{P}{G \times A} \quad (10)$$

Os principais factores que limitam a eficiência do módulo são as perdas ópticas, a diferença de desempenho das células e a temperatura. As perdas ópticas resultam de perdas por reflexão, refacção e absorção nos sistemas ópticos e actualmente situam-se em cerca de 15% da radiação incidente. A diferença de desempenho das células leva a que as células com menor desempenho limitem o funcionamento das restantes, limitando assim a potência produzida [3].

2.6. Constituição do sistema

Na figura seguinte, encontra-se esquematizada uma vista em corte do sistema em que a célula se encontra inserida.

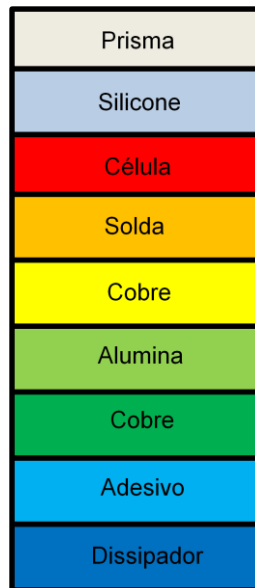


Figura 2.10 – Vista em corte do sistema em estudo. Esta é uma representação esquemática do sistema descrito na Figura 2.3.

O prisma faz parte do sistema óptico e está unido à célula através de um silicone. Para unir a célula à placa de circuito, que consiste numa lamela de alumina metalizada de ambos os lados, é utilizada uma liga metálica de estanho e prata, com baixo ponto de fusão de modo a garantir uma boa adesão, não danificar a célula com temperaturas elevadas durante a brasagem e garantir uma boa condutividade térmica e eléctrica. A placa de circuito possui metalização na parte superior para serem efectuados os contactos metálicos, e na parte inferior para melhorar a adesão ao dissipador. A epoxy termo condutora tem como funções garantir a adesão da placa de circuito ao dissipador, e conduzir o calor gerado. O dissipador tem como função dissipar o calor gerado através de convecção para a atmosfera circundante.

Na Figura 2.11, encontra-se ilustrado o fluxo de calor no sistema, de forma análoga à representação dos circuitos eléctricos. A utilização desta abordagem é comum na resolução de problemas de natureza térmica, como por exemplo no trabalho de Tsai et al [19] em que os autores aplicam esta metodologia à caracterização térmica de LEDs (light emitting diodes). Para uma representação mais completa deveriam também constar as componentes capacitivas dos materiais (associadas ao calor específico de cada material) mas como estamos a lidar com regimes estacionários, não é necessário ter esta componente em conta.

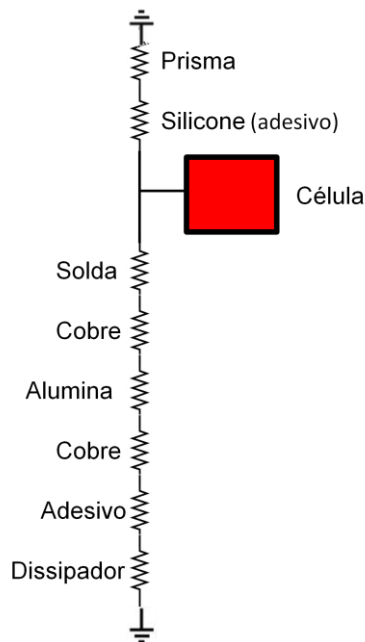


Figura 2.11 – Representação do fluxo de calor e resistividade térmica no sistema em estudo.

Os valores das condutividades térmicas dos materiais utilizados encontram-se na tabela 2.1. O valor da resistividade térmica do dissipador é difícil de achar por si só, por isso o valor de resistência térmica do dissipador encontra-se englobado no parâmetro \bar{h} (equação 3). Quanto ao fluxo de calor através do silicone e o prisma, este é tão reduzido (devido à baixa condutividade térmica destes) que pode ser desprezado. Por isso, durante os cálculos da resistividade térmica só serão considerados os materiais que se encontram na tabela 2.1

Tabela 2.1 – Propriedades térmicas e dimensões dos materiais que constituem o sistema

Material	Área (m ²)	Espessuras (m)	Condutividade (W/(m.K))	Resistividade térmica (m.K/W)
Solda	1.00×10^{-04}	5.00×10^{-05}	50	1.00×10^{-06}
Cobre	1.00×10^{-04}	1.00×10^{-04}	401	2.49×10^{-07}
Alumina	2.50×10^{-03}	5.00×10^{-04}	24	2.08×10^{-05}
Cobre	2.50×10^{-03}	1.00×10^{-04}	401	2.49×10^{-07}
Adesivo	2.50×10^{-03}	5.00×10^{-05}	29	1.72×10^{-06}

2.7. Aproveitamento e conversão de calor

Como referido anteriormente a dissipação é fundamental para manter a eficiência das células em níveis próximos do máximo e assim otimizar o fornecimento de potência do sistema CPV. Por isso é necessário ter um bom dissipador de calor em contacto com a superfície da célula. Se esse calor dissipado poder ser aproveitado como fonte de energia então far-se-ia uma maximização do aproveitamento de toda a energia disponível no CPV.

A conversão de calor em energia eléctrica pode ser efectuada por uma máquina térmica. Uma máquina térmica é um dispositivo que permite obter trabalho útil a partir de um gradiente térmico.

A eficiência de conversão de calor em trabalho depende numa primeira aproximação do gradiente de temperatura, como se pode observar na expressão seguinte[14]:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (11)$$

Em que T_f corresponde à temperatura da fonte fria e T_q à temperatura da fonte quente. Esta aproximação foi proposta por Sadi Carnot e constitui uma situação ideal, em que a máquina térmica funciona segundo um ciclo ideal, sem perdas e segundo ciclos reversíveis, correspondendo portanto à eficiência máxima que uma determinada máquina térmica pode atingir, funcionando com um determinado gradiente de temperatura. Como durante o funcionamento real de uma máquina térmica existem sempre perdas e os ciclos não são reversíveis, a eficiência destas será sempre inferior à eficiência da máquina idealizada por Carnot [14].

Neste trabalho procurou-se em primeiro lugar averiguar as diferentes possibilidades existentes para transformar calor em energia eléctrica ou aproveitar o mesmo. Da pesquisa efectuada, duas possibilidades surgiram como as de mais fácil implementação: O uso de dispositivos termoeléctricos e o uso da energia térmica para aquecimento de um fluido.

Os dispositivos termoeléctricos são uma alternativa já existente comercialmente, apresentando uma eficiência típica de 5% [20], não têm partes móveis e apresentam uma vida útil superior a 11 anos em funcionamento contínuo [20]. No entanto a sua utilização em filme fino, favorável a uma melhor dissipação de calor e menor custo, é difícil devido à fragilidade dos materiais e a dificuldades associadas ao tamanho dos elementos seus constituintes [20]. A condutividade térmica através destes dispositivos constitui uma limitação na sua utilização na indústria da energia solar, pois é desejável uma resistividade térmica baixa nos componentes em contacto com a célula e o sistema de dissipação. Um fabricante, que apresenta informação bastante completa sobre os dispositivos termoeléctrico que fabrica, afirma que os seus dispositivos apresentam uma condução térmica de 0.024 W/cmK [21]. Tal problema pode ser minimizado com uma integração correcta na estrutura.

O uso da energia térmica para aquecimento é outra possibilidade. Esta possibilidade já é explorada em sistemas de grande área concentradora em que a radiação é focada num grupo de células. Devido à elevada densidade de potência que estes sistemas geram e a normalmente estarem associados a concentradores parabólicos, o conjunto de células tem que ser arrefecido por um fluido (arrefecimento activo) que é menos volumoso e mais eficiente do que os sistemas de arrefecimento passivo. O calor que esse fluido transporta pode depois ser utilizado noutras aplicações [22]. Uma empresa que utiliza esta abordagem, a ZenithSolar, afirma conseguir eficiências máximas de 75% de aproveitamento da energia incidente [23]. No entanto apenas uma pequena parte dessa energia é convertida em energia eléctrica [23]. No caso em estudo a utilização de um sistema de arrefecimento activo apresenta desvantagens devido ao maior custo e maior necessidade de manutenção e probabilidade de falha em serviço. Parece ser mais viável uma conversão *in-situ* do calor em energia eléctrica.

Os dispositivos termoeléctricos, compostos por vários elementos de material semicondutor ligados em série, quando sujeitos a um gradiente de temperatura, produzem uma diferença de potencial, este fenómeno é designado por efeito de Seebeck [24]. Inversamente, quando é aplicada uma diferença de potencial ao dispositivo, este vai criar um gradiente de temperatura, e este é designado de efeito de Peltier [24]. A constituição destes dispositivos encontra-se ilustrada na Figura 2.12

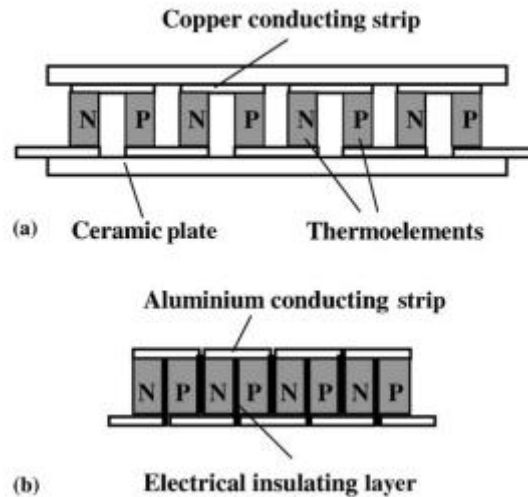


Figura 2.12 – Constituição de um dispositivo termoelétrico, Podem observar-se duas configurações, uma de baixa condutividade térmica (a) e uma de mais alta condutividade térmica (b) [20].

Estes dispositivos, quando integrados no sistema CPV, funcionariam aproveitando o gradiente térmico existente entre a célula solar e o meio ambiente de modo a produzir energia.

Apesar de apresentarem uma baixa eficiência de conversão, as características já referidas fazem deles uma solução a ter em conta e que pode ser implementada a curto prazo. No entanto, a condutividade térmica dos mesmos representará um desafio à sua integração no sistema.

3. Caracterização térmica do sistema CPV produzido pela Magpower

A caracterização térmica das células que constituem o sistema CPV da Magpower foi realizada utilizando uma câmara térmica (câmara de infravermelhos FLIR A320). O espectro em que esta câmara opera situa-se entre os 7,5 μ m e os 13 μ m e o intervalo de temperaturas varia entre os -20°C e os 350°C com um erro de $\pm 2^\circ\text{C}$.

Os ensaios foram realizados medindo ΔT para eliminar a variação da temperatura ambiente durante as medições. A variação de temperatura é calculada da seguinte forma: temperatura máxima detectada numa linha que passa pela célula e a divide ao meio (como ilustrado na Figura 3.1), menos a temperatura mínima detectada na imagem, que irá corresponder à temperatura ambiente.

O aquecimento na amostra foi conseguido por aplicação de uma potência de 100W através da injeção de corrente na célula solar (em modo de polarização directa). Devido a essa injeção de corrente observou-se electroluminescência por parte das células solares. Estas quando ligadas à fonte de potência emitem uma luz de cor vermelha, como se pode ver na Figura 3.3.

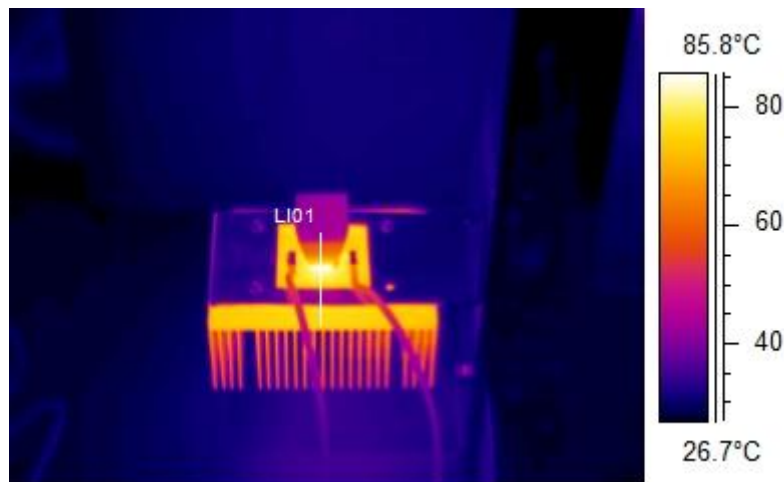


Figura 3.1 - Termografia de uma amostra. A potência aplicada à célula solar durante a captura desta imagem foi de 100W e a temperatura ambiente cerca de 27°C.

Para realizar a caracterização térmica do CPV, foi utilizada a montagem experimental ilustrada na Figura 3.2. Esta montagem experimental foi projectada especificamente para este trabalho e concebida para manter a câmara fixa e sempre à mesma distância da amostra (70cm) e ângulo relativo à amostra também fixo (45°)

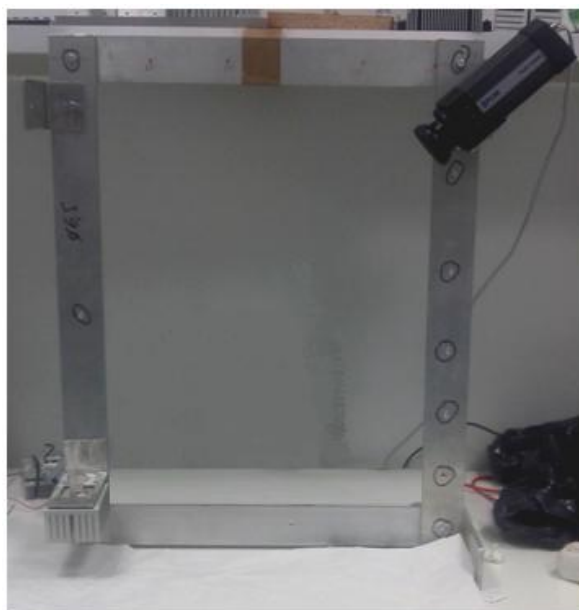


Figura 3.2 – Montagem experimental utilizada para a caracterização térmica.

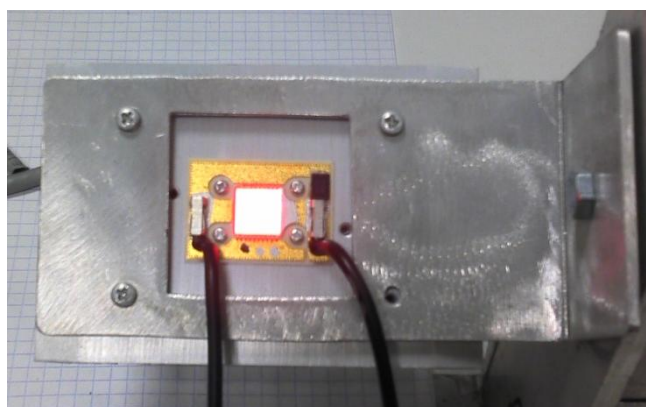


Figura 3.3 – Célula ligada em polarização directa. É possível observar que a célula emite uma luz avermelhada.

3.1. Determinação do tempo de estabilização da temperatura da célula

Foi efectuado um ensaio prévio para determinar o tempo que a temperatura levaria a estabilizar, partindo da temperatura ambiente e aplicando uma potência de 100W à célula. A estabilização da temperatura é importante para que os dados sejam fiáveis e para que os resultados obtidos sejam consistentes. Na Figura 3.4 é possível observar uma imagem do CPV obtida por termografia.



Figura 3.4 – Termografia da amostra utilizada. A potência aplicada durante a captura desta imagem era de 100W e a temperatura ambiente de 24°C.

Na Figura 3.5 mostra-se a variação da temperatura ao longo do tempo de aplicação da potência. Os resultados mostram que a partir dos 10 min a temperatura estabiliza nos 60°C. Este ensaio permitiu assim definir que em qualquer ensaio subsequente é necessário um intervalo de tempo necessário à estabilização da temperatura de pelo menos 10min.

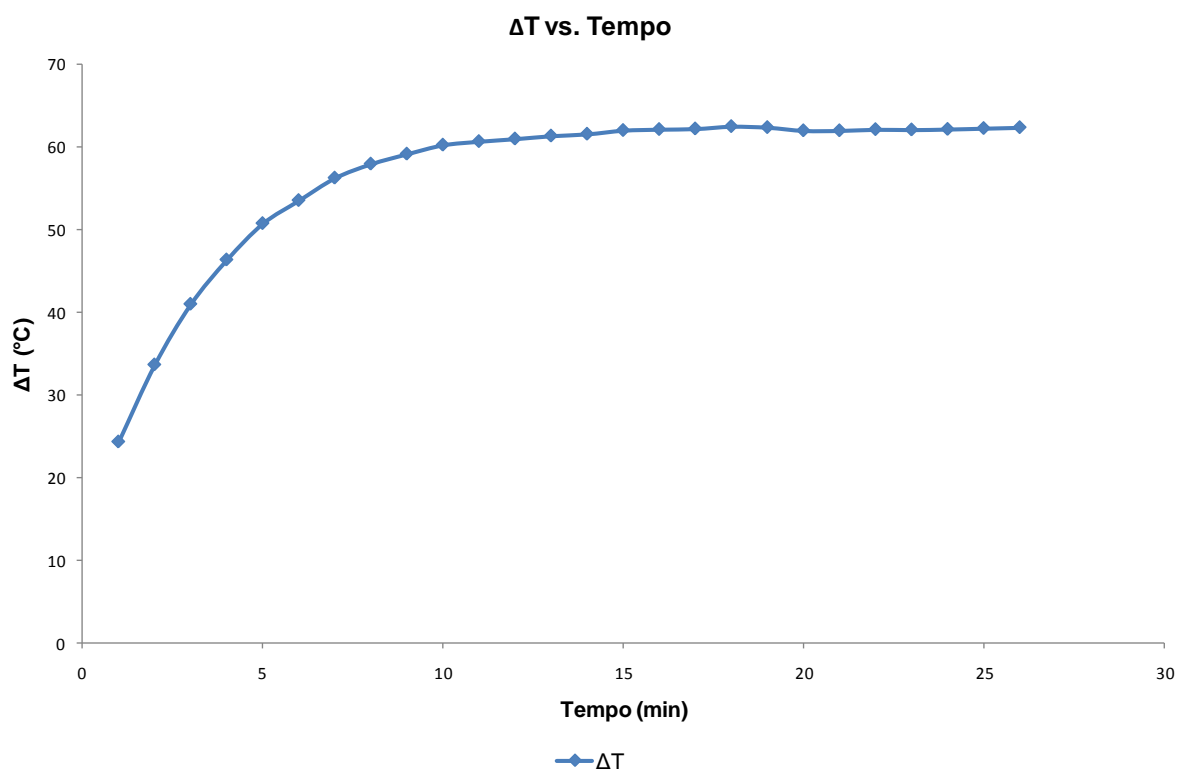


Figura 3.5 – Variação da temperatura com o tempo para uma potência de 100W aplicados à célula.

Houve ainda necessidade de determinar a emissividade da célula e confirmar as leituras obtidas com a câmara térmica (procedimento em anexo). As temperaturas registadas pelo termopar e câmara térmica foram iguais, e a emissividade calculada foi de 0,92.

3.2. Variação da temperatura com a potência aplicada

De modo a estudar a variação da temperatura com a potência da célula foram aplicadas diferentes valores de corrente mantendo a tensão entre 10,3V e 10,8V, utilizando para tal uma fonte de potência regulável. Foram aplicadas potências entre os 10W e os 100W, em intervalos de 10W. A variação de temperatura foi medida no intervalo de tempo em que a potência foi mantida constante. Esse intervalo teve a duração de 30 min e foi mantido constante para todos os valores de potência variados...

Os resultados obtidos estão representados na Figura 3.6 onde se pode observar que a variação global de ΔT com P é linear apesar de dentro de cada intervalo de tempo em que se manteve a potência constante haver uma variação de ΔT . Esta variação está relacionada com a inércia térmica do sistema, como já se tinha observado na Figura 3.5, mas no entanto com o intervalo de tempo foi de 30min este é bastante superior ao mínimo necessário para que haja estabilização da temperatura 10min.

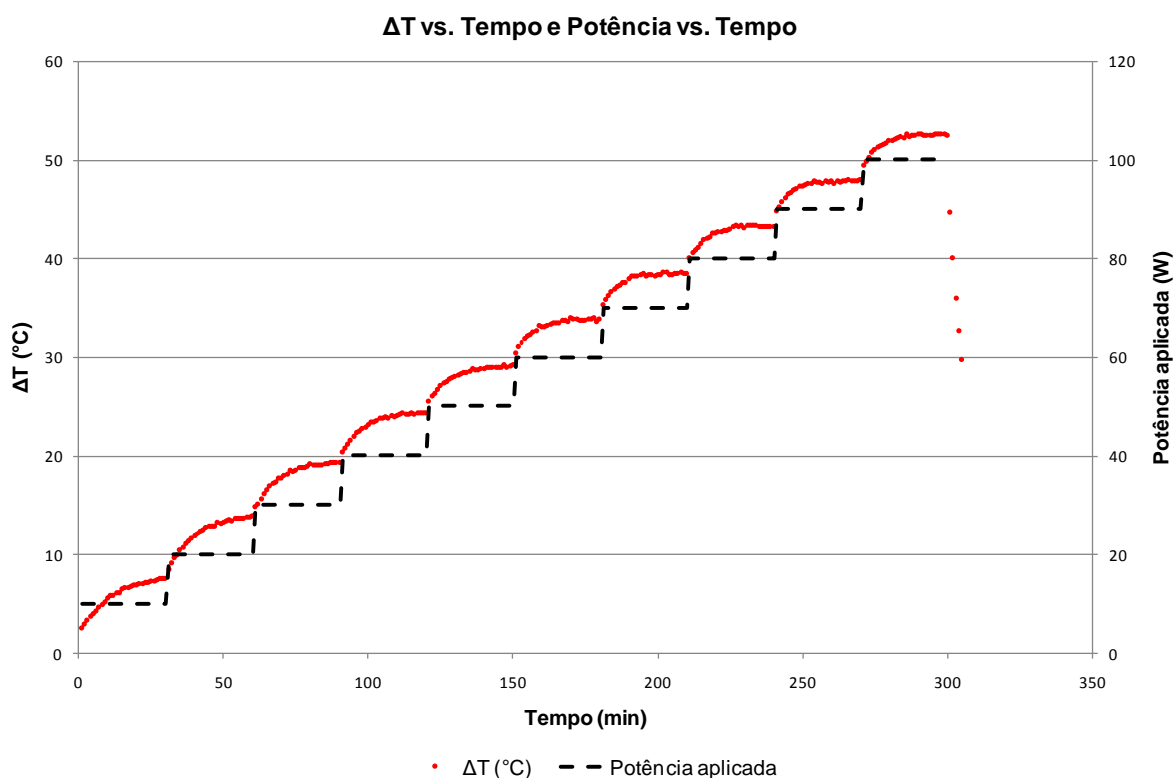


Figura 3.6 – Resultados do primeiro ensaio.

3.3. Influência do encapsulamento

Foram medidas as temperaturas da célula com prisma, sem prisma e sem encapsulamento nem prisma, e com encapsulamento sem prisma, para averiguar se existem diferenças nas temperaturas medidas. Este teste serviu para averiguar a influência do prisma e do encapsulamento da célula na temperatura final.

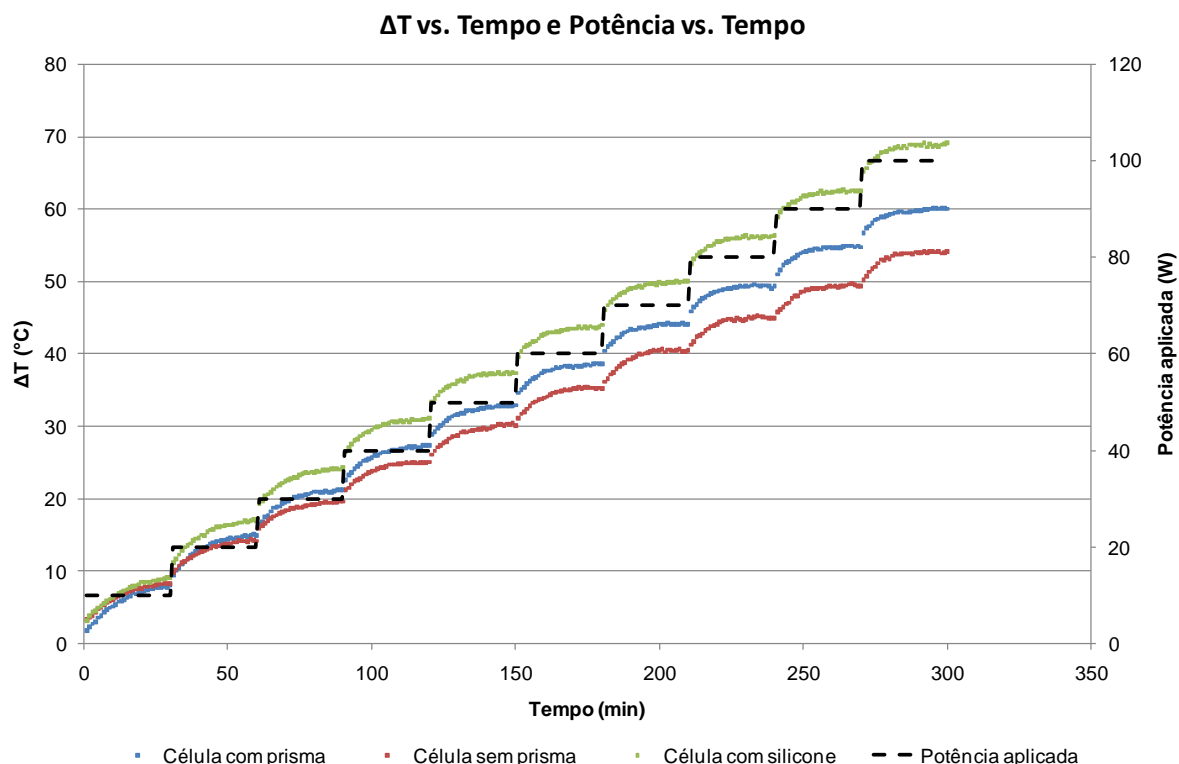


Figura 3.7 – Comparativo entre a célula com prisma, encapsulada e sem prisma nem encapsulamento.

Na Figura 3.7, é possível observar que a célula com prisma atinge temperaturas superiores à célula sem prisma e que a temperatura da célula encapsulada é bastante superior às restantes. Isto pode dever-se ao prisma (e o silicone que o une à célula) impedirem a perda de calor por convecção a partir da superfície da célula. O mesmo pode estar a acontecer na célula encapsulada, mas a diferença de temperatura medida está de tal forma fora do esperado que poder-se-á estar perante algum tipo de defeito na amostra. Este erro pode resultar de uma cura deficiente do adesivo termocondutor. Seriam necessários mais testes para verificar se existe algum erro a influenciar os resultados.

Na Tabela 3.1, encontram-se as diferenças de temperatura registadas para os três casos. A diferença entre as temperaturas registadas varia bastante, com a célula encapsulada a apresentar uma variação maior.

Tabela 3.1 – Diferença entre as temperaturas medidas para os três cenários.

Potência aplicada (W)	ΔT Com prisma ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT Sem prisma ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT Encapsulada ($^{\circ}\text{C}$)
10	8.0	8.3	9.0
20	15.1	14.2	17.0
30	21.3	19.6	24.1
40	27.4	25.0	31.0
50	32.9	30.3	37.3
60	38.7	35.2	43.7
70	44.2	40.4	50.0
80	49.3	44.9	56.2
90	54.8	49.4	62.5
100	60.1	53.9	69.0

3.4. Influência do posicionamento do CPV

Fez-se um estudo comparativo para averiguar a influência que o ângulo a que o CPV se encontra produz sobre a temperatura da célula. Esta relação entre o ângulo e a temperatura máxima de

funcionamento é importante, pois as regiões mais quentes e com maior insolação situam-se em latitudes mais baixas. Em latitudes próximas do equador, ao meio dia, o ângulo que o CPV apresentará será próximo dos 0° , o que irá dificultar a circulação de ar através do dissipador.

3.4.1. Caracterização dos CPV sem ângulo

Neste ensaio foi caracterizado um conjunto de amostras de CPV utilizando o método de caracterização já definido, com o objectivo de avaliar a uniformidade das características térmicas dos mesmos.

A Figura 3.8, mostra que os CPV produzidos apresentam uma boa uniformidade do ponto de vista térmico. A variação de temperatura é similar para as 5 amostras estudadas.

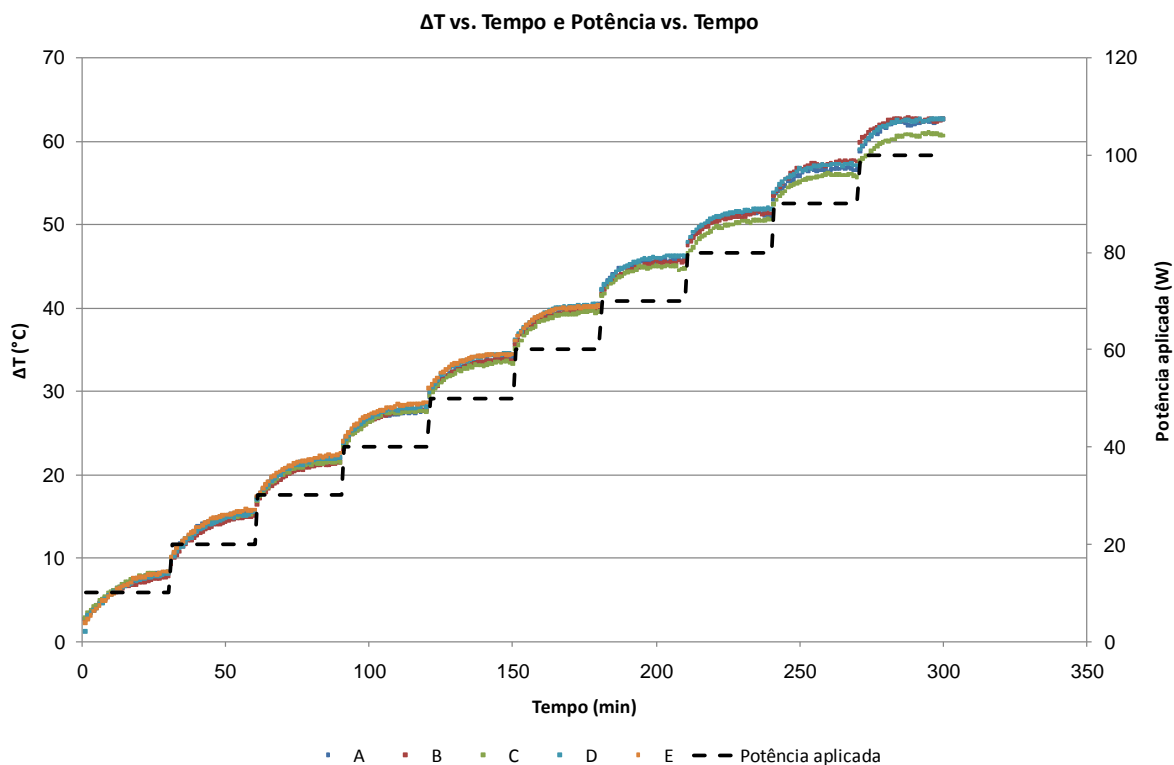


Figura 3.8 - ΔT vs. Tempo e Potência vs. Tempo para várias amostras, com o CPV na horizontal (0°).

Observando os resultados da Tabela 3.2 é possível concluir que a temperatura que as amostras atingem é idêntica e que o desvio padrão é sempre inferior a 1°C.

Tabela 3.2 – Resultados e estatística das amostras em estudo.

Potência (W)	ΔT A (°C)	ΔT B (°C)	ΔT C (°C)	ΔT D (°C)	ΔT E (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)
10.0	8.2	7.8	8.2	8.1	8.3	8.1	0.2
20.0	15.5	15.0	15.3	15.5	15.7	15.4	0.3
30.0	21.9	21.4	21.5	22.0	22.3	21.8	0.4
40.0	27.6	27.8	27.6	28.2	28.5	28.0	0.4
50.0	34.0	33.7	33.4	34.5	34.3	34.0	0.4
60.0	40.3	39.8	39.5	40.4	40.1	40.0	0.4
70.0	45.8	45.5	44.6	46.2	N/A	45.5	0.7
80.0	51.1	51.3	50.6	51.9	N/A	51.2	0.5
90.0	56.6	57.6	55.9	57.2	N/A	56.8	0.7
100.0	62.6	62.4	60.8	62.7	N/A	62.1	0.9

3.4.2. Caracterização dos CPV com ângulo de 45°C

Este ensaio foi efectuado para comparar o ΔT atingido consoante o ângulo a que o CPV se encontra, e para servir de referência no ensaio de caracterização com vento.

A Figura 3.9 mostra que a amostra D apresenta um ΔT ligeiramente superior às outras. Uma das razões para este comportamento pode residir no facto de o ensaio de caracterização ter sido interrompido por mais do que uma vez e ser reiniciado, levando a que a célula estivesse exposta durante mais tempo a temperaturas mais altas e sujeita a variações na corrente eléctrica, o que poderá ter de alguma forma alterado o desempenho eléctrico da célula ou a condutividade térmica de algum dos constituintes do sistema.

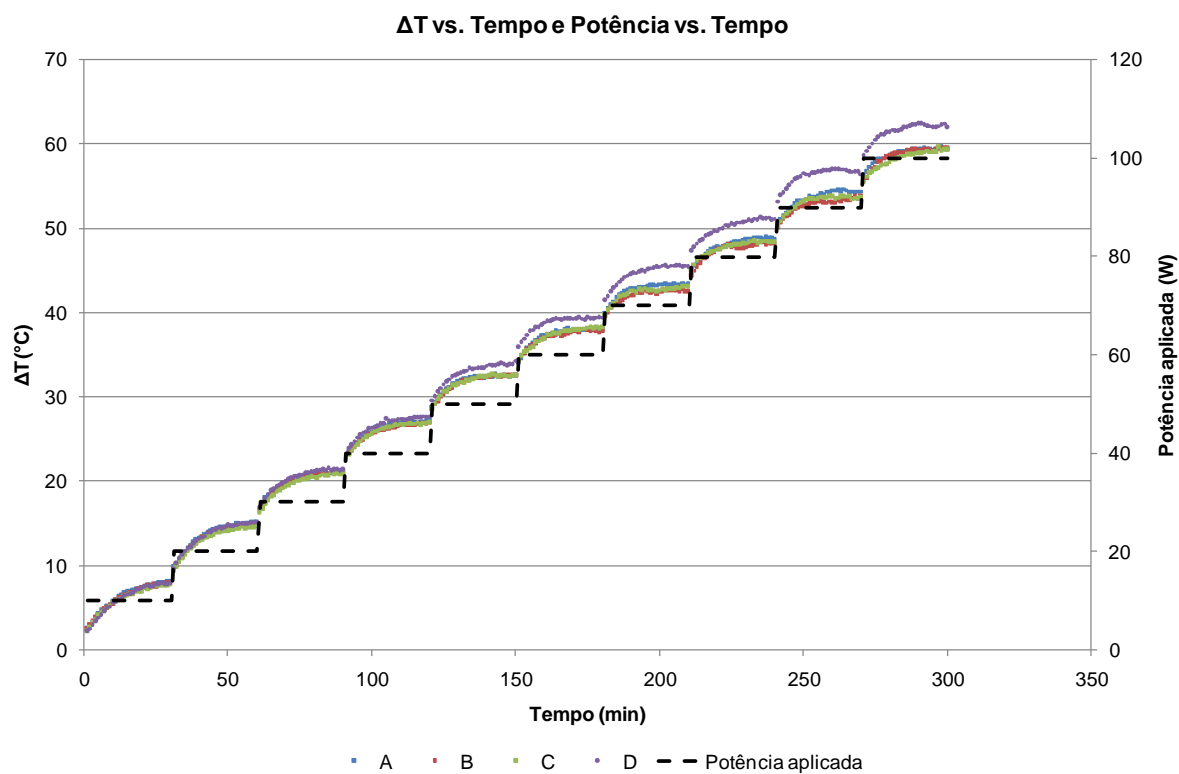


Figura 3.9 - ΔT vs tempo e Potência vs tempo para várias amostras com inclinação de 45°. A amostra E não foi incluída porque deixou de funcionar.

Na tabela 3.3 comparam-se os resultados obtidos sem inclinação e com a inclinação de 45° para cada uma das potências aplicadas na célula.

Tabela 3.3 – Diferença entre os valores registados para uma inclinação de 0° e 45°.

Potência aplicada (W)	Diferença de temperatura (0° - 45°) (°C)	Diferença (%)
10.0	0.23	0.97
20.0	0.40	0.97
30.0	0.68	0.97
40.0	0.77	0.97
50.0	1.04	0.97
60.0	1.62	0.96
70.0	1.86	0.96
80.0	2.05	0.96
90.0	2.22	0.96
100.0	1.94	0.97

Os resultados mostram que a diferença de temperatura registada entre ambos os ângulos é reduzida e pouco significativa. Isto não quer dizer que para ângulos pequenos (inferiores a 60°) a diferença de temperatura não se acentue, mas como nas condições de operação reais o sistema dificilmente atingirá este ângulo durante os períodos de maior irradiância, o seu estudo torna-se pouco relevante do ponto de vista térmico.

3.5. Influência da velocidade do vento

O vento é um factor que pode reduzir drasticamente a temperatura a que o sistema se encontra, mas é um factor imprevisível, por norma inconstante e esporádico. Por isso quando um sistema é projectado, deve ter em consideração o pior cenário possível, ou seja neste caso a ausência de vento. No entanto, conhecer como esse factor influencia a temperatura do sistema é importante porque o vento faz diminuir a temperatura do sistema e, consequentemente, a eficiência aumenta. Em termos de potência anual total, estas diferenças provocadas pelo vento podem contribuir para um aumento significativo da potência produzida. Na Figura 3.11, pode observar-se a caracterização de 4 amostras, com vento a promover o arrefecimento do CPV. Com a ajuda de uma ventoinha fez-se incidir a direcção do vento com o mesmo paralelamente às palhetas do dissipador, como se pode observar na Figura 3.10.

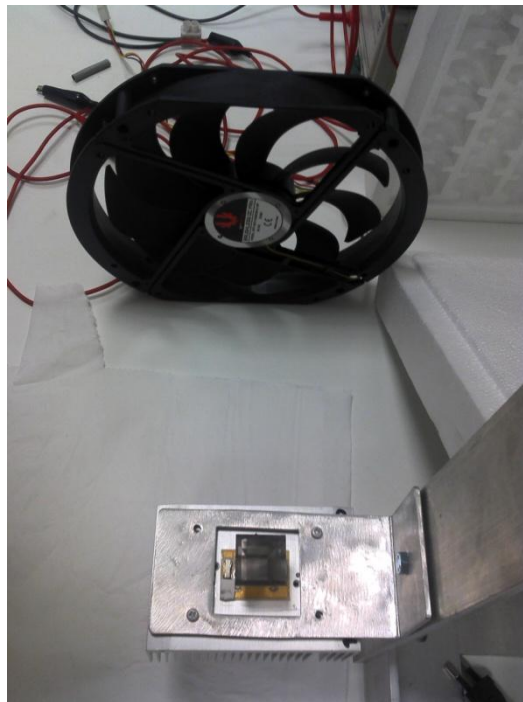


Figura 3.10 – Direcção do vento. A ventoinha situa-se a cerca de 15cm do CPV

A Figura 3.11 mostra os resultados obtidos para a variação de temperatura com o tempo para os diferentes valores de potência da célula, estando o CPV com uma inclinação de 45° e uma velocidade do vento entre 3 e 4km/h. Observa-se um decréscimo significativo na variação de temperatura sendo esta no máximo de 30° para $P=100W$ valor este que é cerca de metade do valor obtido sem vento. Essa diferença está bem evidenciada nos resultados que mostram na tabela 3.4.

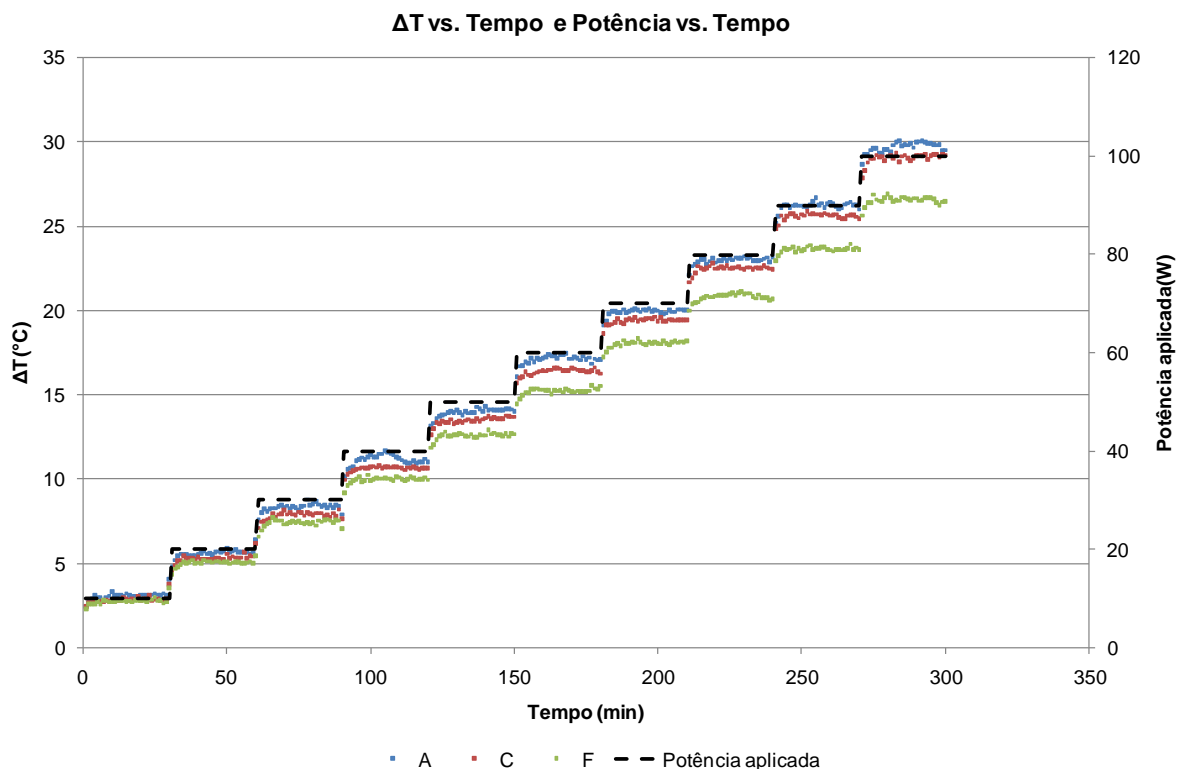


Figura 3.11 - ΔT vs tempo e Potência vs tempo para várias amostras com inclinação de 45° e vento com velocidade entre os 3 e os 4 km/h. Neste ensaio a amostra E foi substituída pela amostra F porque sofreu uma falha eléctrica. A amostra B sofreu uma anomalia durante o ensaio e por isso não foi incluída.

Tabela 3.4 – Diferença entre a temperatura dos CPV com e sem vento.

Potência aplicada (W)	ΔT sem vento (°C)	ΔT com vento (°C)	Diferença (°C)	Diferença (%)
10.0	7.9	3.1	4.8	60.2
20.0	15.0	5.5	9.5	63.3
30.0	21.2	9.8	11.4	53.7
40.0	27.2	13.1	14.1	51.9
50.0	33.0	13.2	19.8	60.0
60.0	38.4	16.0	22.4	58.3
70.0	43.7	18.9	24.8	56.8
80.0	49.2	21.8	27.4	55.7
90.0	54.6	24.9	29.7	54.4
100.0	60.2	27.9	32.3	53.6

A diferença de temperaturas varia entre os 54% para potências mais elevadas e os 60% para potências mais baixas. Esta variação pode reflectir um decréscimo da potência fornecida pela célula entre 0,24% e 1.62%, consoante a potência (10W ou 100W)

4. Optimização do sistema

4.1. Modelação térmica

Para prever o comportamento do sistema foi criado um modelo teórico.

Recorrendo à lei de Fourier sobre a transferência de calor e à lei de Newton sobre convecção, ambas para o estado estacionário, chegou-se a uma expressão para a variação da temperatura da célula.

4.1.1. Dedução da expressão

A lei de Fourier pode ser trabalhada, de modo a obter uma expressão mais simples:

$$q_1 = -k \frac{dT}{dx} \leftrightarrow q_1 = \frac{-k}{r} dT \leftrightarrow q_1 = -\frac{dT}{r} \leftrightarrow \quad (12)$$

Em que r é a resistividade térmica do material.

Como a variação de temperatura é considerada linear, a expressão pode ser escrita da seguinte forma:

$$q_1 = -\frac{\Delta T}{r} \quad (13)$$

A expressão relativa a um caso estacionário da lei do arrefecimento de Newton:

$$q_2 = -\bar{h} dT \quad (14)$$

Como a variação de temperatura é considerada linear, a expressão pode ser escrita da seguinte forma:

$$q_2 = -\bar{h} \Delta T \quad (15)$$

As duas equações podem ser escritas de uma forma estendida, para que se possam relacionar a variável temperatura

$$q_1 = -\frac{(T_{\text{dissipador}} - T_{\text{célula}})}{r} \quad (16)$$

$$q_2 = -\bar{h}(T_{\text{ambiente}} - T_{\text{dissipador}}) \quad (17)$$

Reescrevendo a equação de Newton em ordem à temperatura do dissipador, e substituindo na lei de Fourier, obtém-se a seguinte expressão:

$$q_1 = -\frac{\frac{q_2}{\bar{h}} + T_{\text{ambiente}} - T_{\text{célula}}}{r} \quad (18)$$

Reescrevendo a equação em ordem à temperatura da célula:

$$T_{\text{célula}} = r q_1 + \frac{q_2}{\bar{h}} + T_{\text{ambiente}} \quad (19)$$

Finalmente, reescrevendo a equação em ordem a ΔT , obtém-se a equação na sua forma final

$$\Delta T = r q_1 + \frac{q_2}{\bar{h}} \quad (20)$$

Em que r é a resistividade térmica dos materiais constituintes, q_1 o fluxo de calor entre a célula e o dissipador, q_2 o fluxo de calor entre o dissipador e o meio ambiente e \bar{h} o coeficiente de transferência térmica médio do dissipador para o ar.

Nesta expressão não está incluída a transferência de calor por radiação, porque o fluxo de calor entre a célula e o meio ambiente é tão baixo que pode ser desprezado.

Na literatura é referido que \bar{h} varia de acordo com $\Delta T^{\frac{1}{x}} + c$, em que c é uma constante, para a convecção natural [10], pelo que foi utilizada a seguinte expressão para determinar \bar{h} e a sua variação com a temperatura:

Variação de \bar{h}

$$\bar{h} = c + \Delta T^{\frac{1}{x}} \quad (21)$$

Após efectuar os cálculos, recorrendo aos dados experimentais e à expressão 20, chegou-se à seguinte expressão:

$$\bar{h} = 7,75 + \Delta T^{\frac{1}{2,15}} \quad (22)$$

Os valores de \bar{h} foram então calculados recorrendo aos ΔT medidos para o ângulo de 90° (quando a temperatura estabiliza para uma determinada potência), e os seus valores encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de \bar{h} .

ΔT medido (°C)	\bar{h} (W/K.m ²)
7.9	10.36
15.1	11.29
21.9	11.95
28.1	12.47
33.3	12.85
38.9	13.24
44.2	13.58
49.9	13.91
55.4	14.22
60.8	14.51

Durante a modelação do sistema, surgiu uma grande discrepância entre a temperatura estimada e a temperatura medida. Tal discrepância dever-se-á, muito provavelmente, à potência que é transformada em radiação luminosa na célula, logo o valor da potência a ser dissipada sob a forma de calor será inferior à potência fornecida pela fonte. Na tabela 4.2 encontra-se uma estimativa da potência a dissipar, para as várias potências aplicadas. Em média, estima-se que a eficiência de conversão de energia da radiação incidente na célula se situe nos 21,1%. Para confirmar este valor, deveria ser seguido um procedimento para determinar a eficiência de funcionamento da célula como díodo emissor de luz semelhante ao sugerido por Tsai et al [19].

Tabela 4.2 – Potência dissipada sob a forma de calor.

Potência aplicada (W)	ΔT previsto ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT medido ($^{\circ}\text{C}$)	Potência efectiva (W)
10	10.0	7.9	7.90
20	18.7	15.1	16.17
30	26.9	21.9	24.45
40	34.8	28.1	32.37
50	42.5	33.3	39.11
60	50.0	38.9	46.76
70	57.3	44.2	54.10
80	64.3	49.9	62.07
90	71.3	55.4	69.91
100	78.1	60.8	77.87

Após feita esta correcção, os resultados obtidos utilizando o modelo teórico assemelham-se bastante aos resultados obtidos experimentalmente. Na Tabela 4.3 mostram-se os valores obtidos, bem como um comparativo entre ambos.

Tabela 4.3 – Comparativo entre os valores teóricos e os valores experimentais.

Potência aplicada (W)	Potência a dissipar (W)	ΔT previsto ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT medido ($^{\circ}\text{C}$)	Diferença entre previsto e medido ($^{\circ}\text{C}$)	Diferença percentual
10	7.89	7.9	7.9	0.0	-0.1%
20	15.78	14.8	15.1	-0.4	-2.4%
30	23.67	21.2	21.9	-0.7	-3.3%
40	31.56	27.4	28.1	-0.7	-2.6%
50	39.45	33.6	33.3	0.3	0.9%
60	47.34	39.4	38.9	0.5	1.2%
70	55.23	45.2	44.2	0.9	2.0%
80	63.12	50.7	49.9	0.8	1.7%
90	71.01	56.2	55.4	0.9	1.5%
100	78.9	61.6	60.8	0.8	1.3%

Na Figura 4.1, é possível observar o ajuste do modelo criado aos dados obtidos experimentalmente.

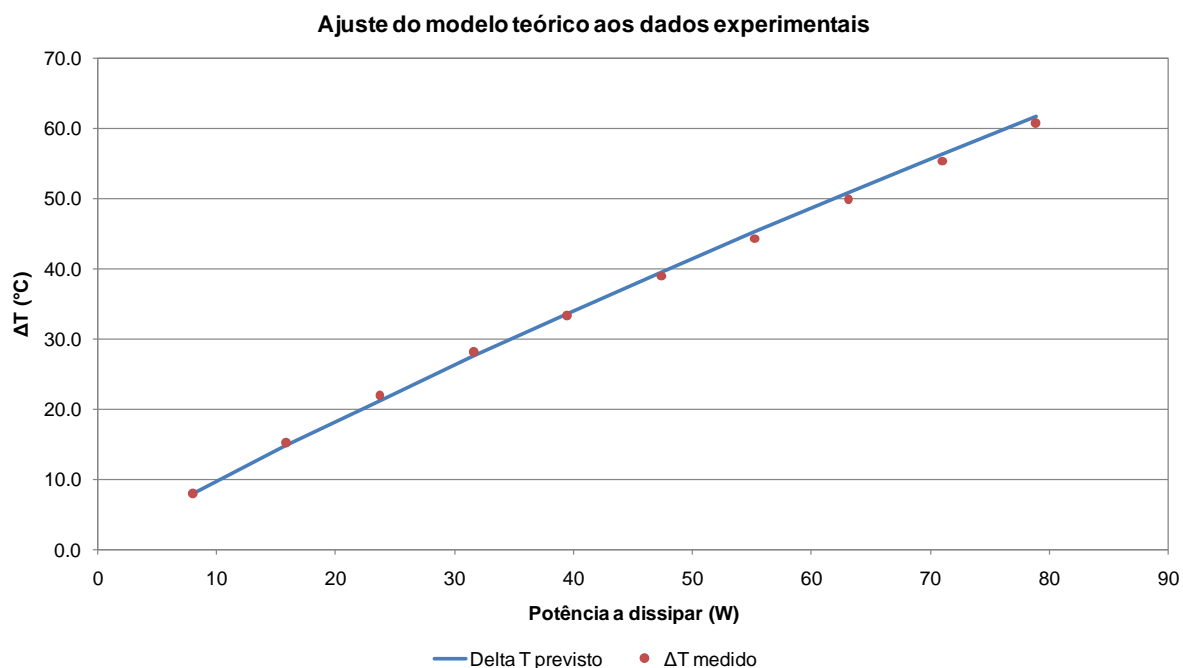


Figura 4.1 – Dados teóricos e dados experimentais em função da potência da célula.

A figura mostra que existe um bom ajuste dos dados experimentais com os obtidos pela equação 22. O modelo criado foi posteriormente comparado com os dados obtidos da caracterização das amostras da Figura 3.8, para verificar a sua aplicabilidade. Na Figura 4.2 é possível observar essa mesma comparação.

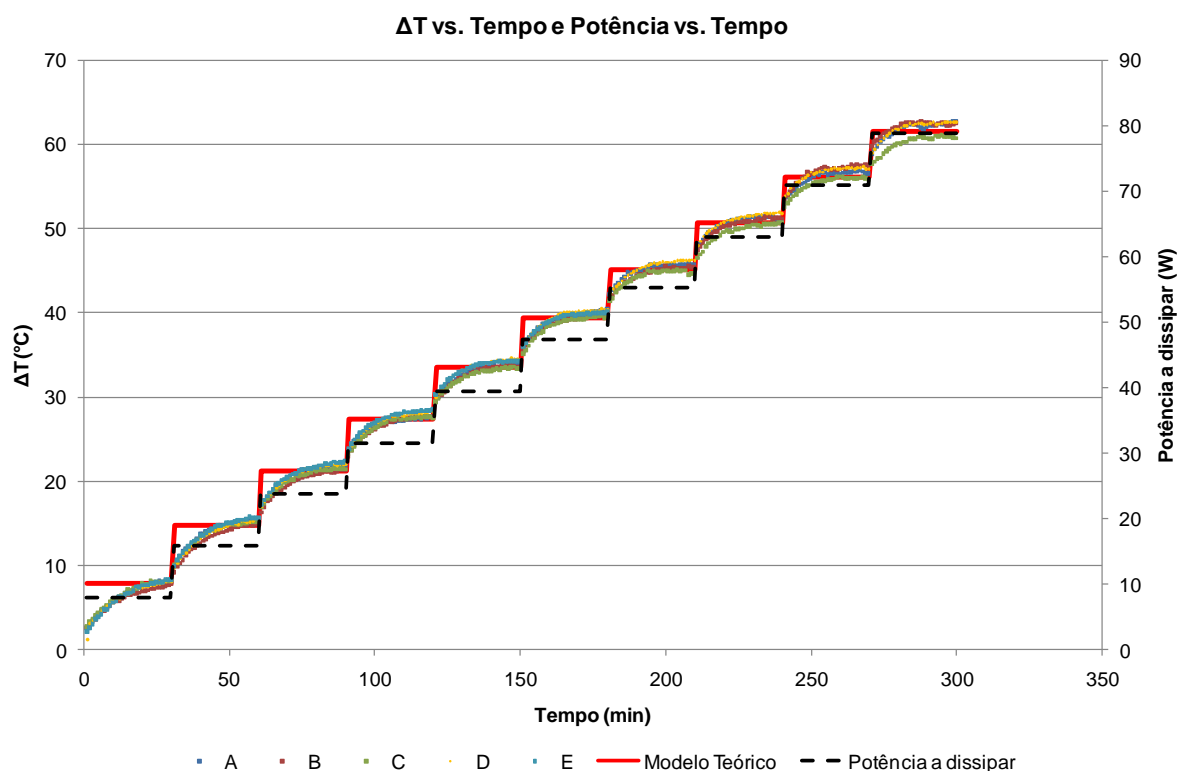


Figura 4.2 - ΔT vs tempo e Potência vs tempo para várias amostras e temperatura prevista pelo modelo teórico.

Analisando a Figura 4.2, observa-se que as temperaturas previstas pelo modelo não se ajustam por completo aos dados experimentais durante a fase de aquecimento. Tal deve-se ao modelo ter sido

idealizado para o estado estacionário, e não ter em conta o tempo de aquecimento/arrefecimento do sistema.

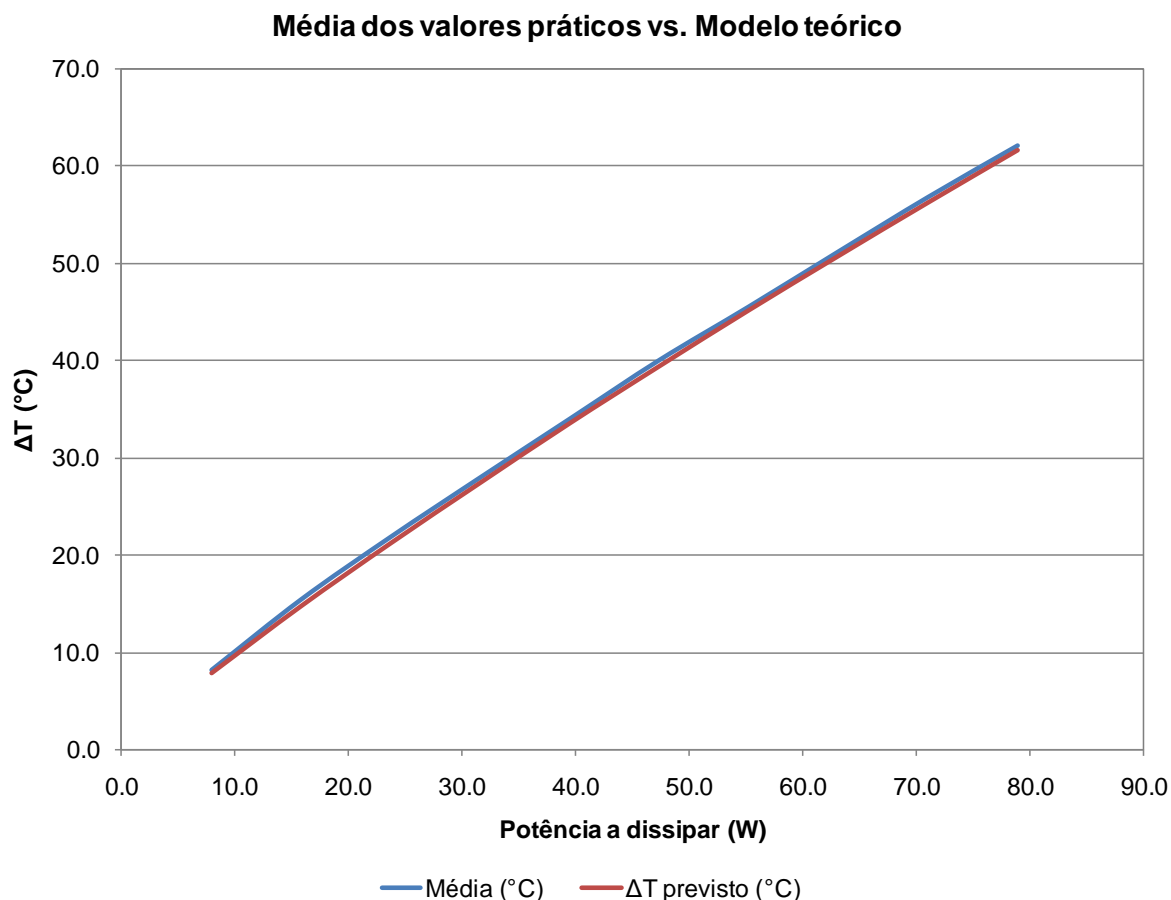


Figura 4.3 – Comparativo entre a temperatura média das amostras e a temperatura prevista.

Na figura 4.3 é possível observar que as linhas são quase coincidentes, o que significa que existe um bom ajustamento do modelo criado aos resultados obtidos.

A variação entre a média dos valores máximos de ΔT atingidos para cada potência e os valores de ΔT previstos está indicada na tabela 4.4. Analisando os dados, é visível que as previsões de ΔT diferem em menos de 1°C das médias de ΔT obtidas e em termos percentuais, a diferença é sempre inferior a 4%.

O modelo criado permite simular alterações na constituição do sistema, desde que o dissipador e condições de teste sejam iguais às utilizadas, no entanto o procedimento efectuado para calcular o parâmetro T_h pode ser aplicado a outros dissipadores, permitindo assim ajustar o modelo a outros sistemas.

Tabela 4.4 – Resultados obtidos e resultados previstos

Potência (W)	Média (°C)	ΔT previsto (°C)	Diferença (%)
7.9	8.1	7.9	2.5
15.8	15.4	14.8	3.9
23.7	21.8	21.2	2.8
31.6	28.0	27.4	2.1
39.5	34.0	33.6	1.2
47.3	40.0	39.4	1.5
55.2	45.5	45.2	0.7
63.1	51.2	50.7	1.0
71.0	56.8	56.2	1.1
78.9	62.1	61.6	0.8

4.2. Alterações propostas ao CPV actual

Utilizando o modelo criado, foram simuladas alterações ao actual sistema, de modo a diminuir a temperatura a que o sistema opera e assim otimizar a sua eficiência, longevidade e fiabilidade.

Na Figura 4.4, mostra-se a variação da temperatura do CPV actual e o resultado simulado de um CPV alterado. Nesta alteração, o material cerâmico seria substituído por nitreto de alumínio, com uma condutividade térmica mínima de 140 W/m.K (nitreto de alumínio *low grade*).

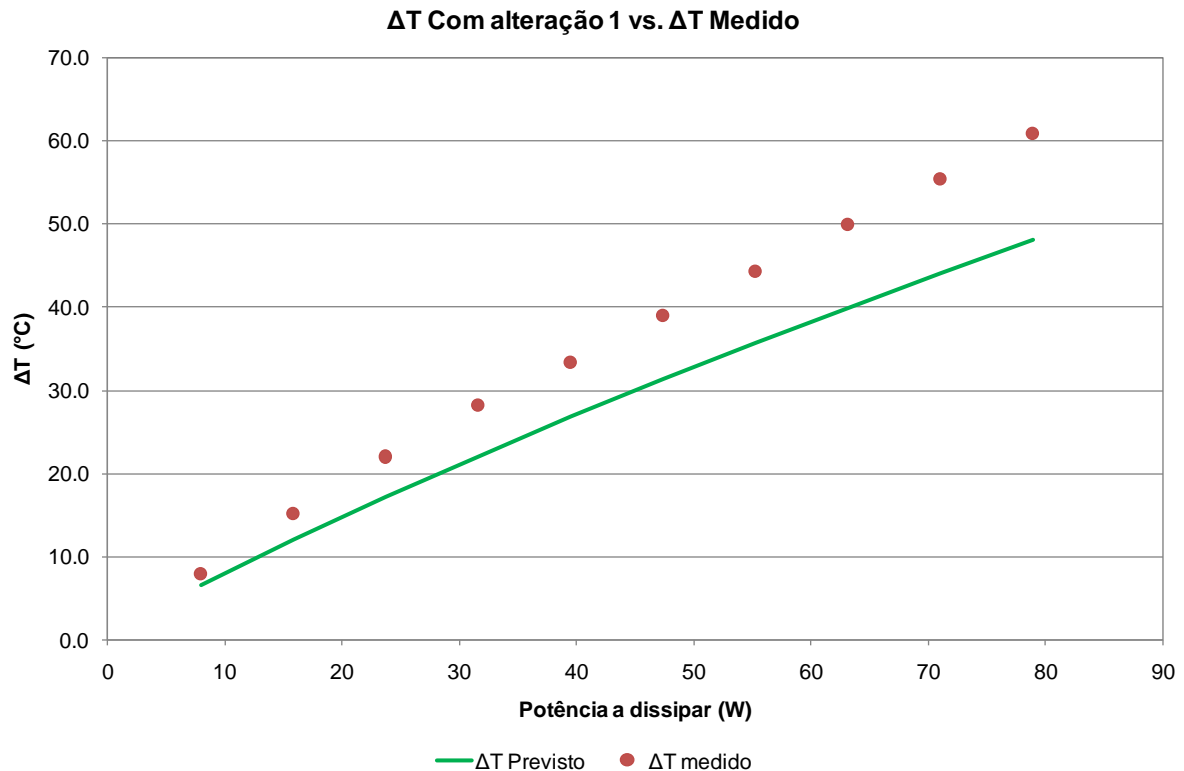


Figura 4.4 – Comparativo entre o desempenho do CPV actual com o desempenho de um CPV alterado.
Nesta alteração, o material cerâmico seria substituído por nitreto de alumínio (AlN), com uma condutividade térmica mínima de 140 W/m.K (nitreto de alumínio *low grade*).

Analisando a Figura 4.4, é possível observar que a substituição do material cerâmico utilizado na placa de circuito por Nitreto de alumínio teria um impacto positivo na diminuição da temperatura a que o sistema opera. Essa variação é mais significativa para potências mais elevadas e tem uma diminuição máxima de 13°C. Com esta diminuição o incremento na potência da célula seria de 0,65%.

O gráfico da Figura 4.5 mostra o mesmo tipo de variação agora para um CPV em que o material cerâmico seria substituído por óxido de berílio (BeO), com uma condutividade térmica mínima de 300 W/m.K.

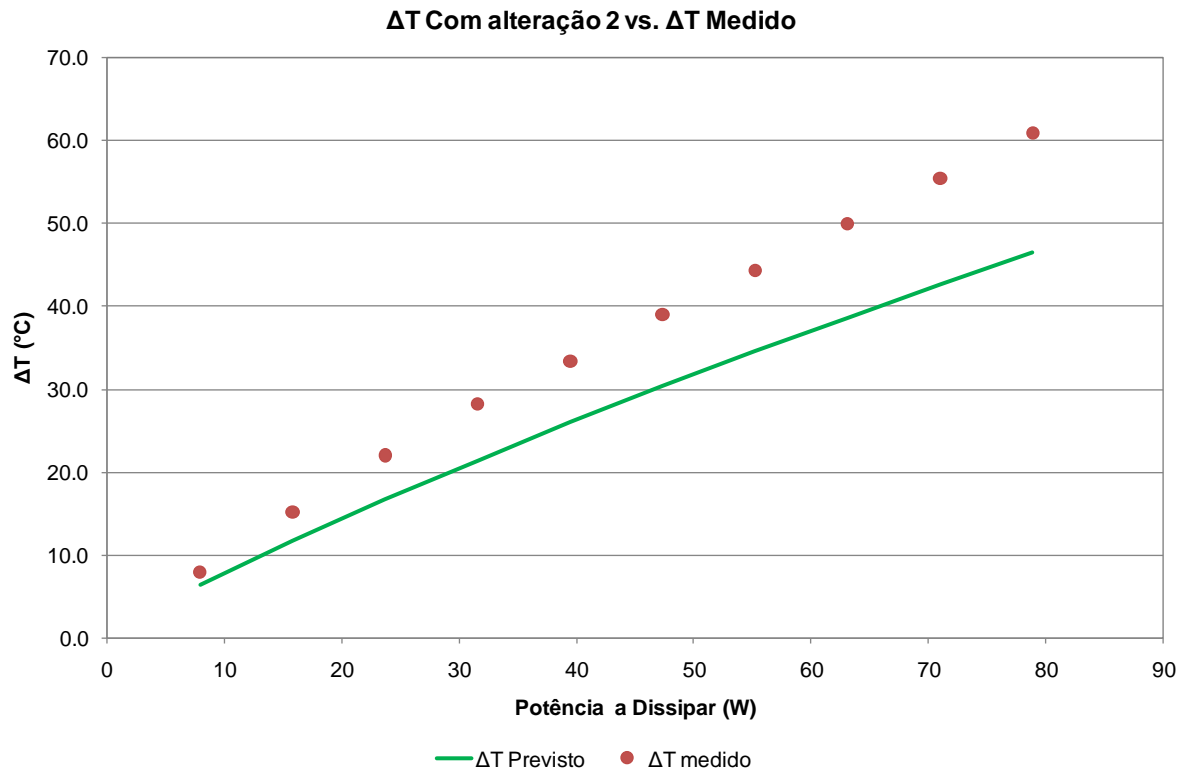


Figura 4.5 - Comparativo entre o desempenho do CPV actual com o desempenho de um CPV alterado.

A substituição do material cerâmico utilizado na placa de circuito *por* óxido de berílio também contribuiria para diminuir a temperatura a que o sistema opera. No entanto, este material apresenta problemas de toxicidade. A diminuição de temperatura em relação ao sistema actual seria no máximo de 15°C, representando um aumento de eficiência de 0,75%

Outra ideia de alteração do sistema actual CPV foi de substituir, o adesivo termocondutor por uma liga de soldadura à base de estanho e com uma condutividade térmica de aproximadamente 50 W/m.K. Os resultados da simulação estão representados na Figura 4.6.

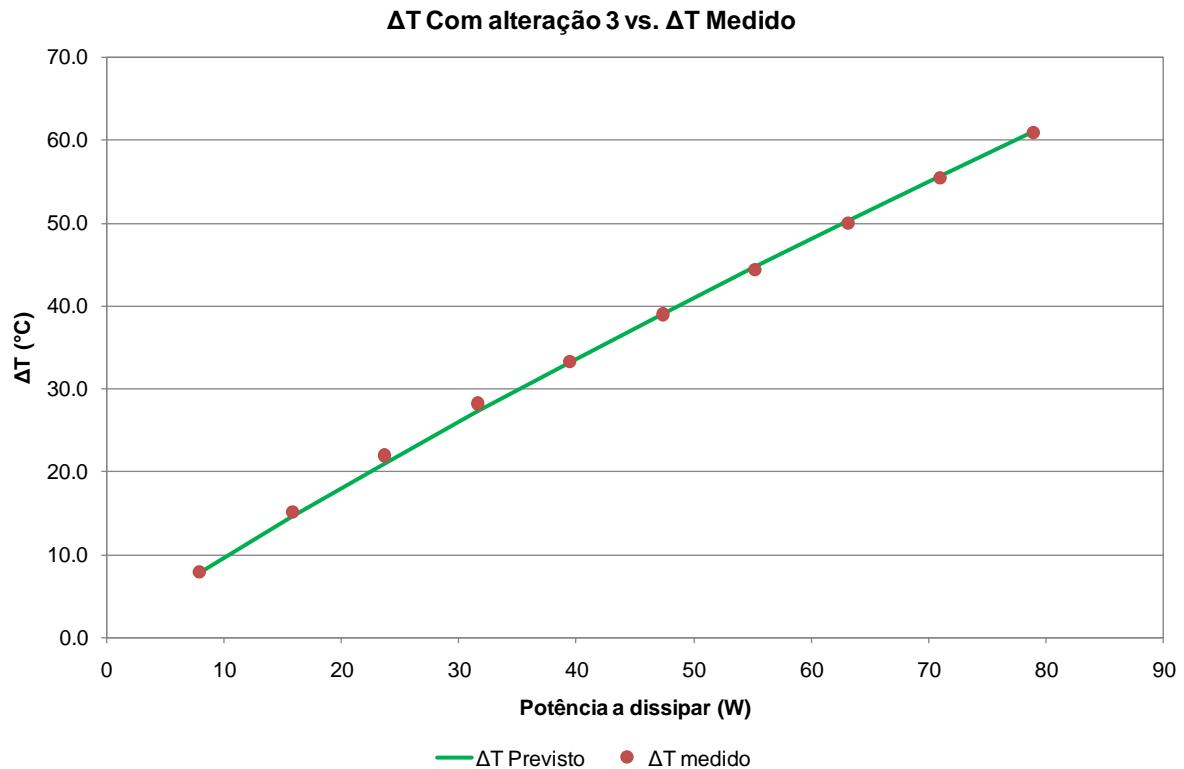


Figura 4.6 - Comparativo entre o desempenho do CPV actual com o desempenho de um CPV alterado.

A substituição do adesivo termocondutor actualmente utilizado por uma liga de soldadura à base de estanho não iria alterar o comportamento térmico do actual sistema., No entanto, esta alteração pode trazer benefícios a nível estrutural, como será explicado mais adiante.

Em resumo, das três alterações propostas apenas as duas primeiras contribuiriam para uma diminuição significativa da temperatura do CPV. Consultando os preços destes três materiais junto de um fornecedor de reagentes químicos [25] estima-se que o nitreto de alumínio seja duas vezes mais caro do que a alumina (99% de pureza) e que o óxido de berílio seja 25 vezes mais caro do que a alumina. A melhor alteração em termos térmicos seria substituir a alumina por óxido de berílio, mas o melhor candidato para a substituição da alumina como material do substrato da placa de circuito é o nitreto de alumínio, pois o óxido de berílio é o mais caro dos três, e é tóxico [26]. O ganho de eficiência máximo utilizando o nitreto de alumínio seria de 0,65%.

Tabela 4.5 - Variação de temperatura no sistema, para as várias alterações.

Potência a dissipar (W)	ΔT Sistema actual (°C)	ΔT alteração 1 (°C)	ΔT alteração 2 (°C)	ΔT alteração 3 (°C)
7.9	7.9	6.5	6.4	7.8
15.8	15.1	12.0	11.7	14.6
23.7	21.9	17.1	16.7	21.0
31.6	28.1	22.0	21.4	27.2
39.5	33.3	26.7	26.0	33.3
47.3	38.9	31.2	30.3	39.1
55.2	44.2	35.6	34.6	44.8
63.1	49.9	39.9	38.7	50.3
71.0	55.4	44.0	42.6	55.7
78.9	60.8	48.0	46.5	61.0

Recorrendo à expressão descrita por Chiang *et al* [12] e às especificações do fabricante, é possível estimar qual será a potência a dissipar sob a forma de calor, como apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Cálculo da potência térmica máxima a que o CPV vai estar sujeito.

Taxa de Concentração (x)	Eficiência da célula (%)	Irradiância (W/m ²)	Área da célula (m ²)	Potência a dissipar (W)
800	36.2	1000	0.0001	51.0

A potência térmica máxima que o sistema terá que dissipar será de 51 W. A eficiência varia com o aumento de temperatura, mas atendendo a que a eficiência da célula para a gama de temperaturas mais elevada ronda os 35% (dados do fabricante), a que corresponde a uma potência térmica de 52W.

O patamar de potência utilizado nos ensaios experimentais que mais se aproxima destes valores é de 55.2 W, pelo que a resistividade térmica total, bem como a temperatura máxima atingida pela célula em condições extremas serão estimadas para este patamar (majorar a estimativa)

Tabela 4.7 – Cálculo da resistividade térmica total do sistema actual e das alterações propostas.

Resistividade térmica total do sistema actual (°C/W)	Resistividade térmica total (°C/W) da alteração 1	Resistividade térmica total (°C/W) da alteração 2	Resistividade térmica total (°C/W) da alteração 3
0.80	0.65	0.63	0.81

A resistividade térmica do sistema actual é de 0,8 °C/W. Este valor é obtido simplesmente dividindo o ΔT medido pela potência aplicada, e é um parâmetro que não é exactamente linear, pois engloba a resistividade térmica do dissipador, que varia, ainda que ligeiramente, com a temperatura. No entanto, é um parâmetro que pode ser utilizado para diferenciar quantitativamente as diferentes alterações idealizadas. Olhando para os valores de resistividade térmica das alterações, é possível observar que substituindo o substrato de alumina por um de óxido de berílio (alteração 2) obtém-se o menor valor de resistividade térmica. No entanto a alteração mais vantajosa (não tóxica, mais económica) é a alteração 1 correspondendo ao nitreto de alumínio. Comparativamente com a solução actual esta solução é menos económica, mas o rendimento extra obtido pode compensar a alteração.

Na Tabela 4.8, apresenta-se uma estimativa das temperaturas atingidas pela célula para uma temperatura ambiente de 40°C sem vento (pior cenário) para o sistema actual e para as várias alterações. É de salientar que as temperaturas máximas atingidas pelo sistema actual ficam bastante abaixo da temperatura de operação máxima recomendada pelo fabricante (110°C), mas qualquer diminuição da temperatura do sistema contribuirá para manter mais elevada a eficiência do sistema (e por conseguinte a potência produzida) e diminuir a probabilidade de falha do sistema. É ainda possível observar que para este cenário a substituição do material da placa de circuitos traduz-se num decréscimo da temperatura máxima em cerca de 8°C, correspondendo a um aumento de eficiência de 0,4%.

Tabela 4.8 – Temperaturas máximas da célula estimadas para uma temperatura ambiente de 40°C.

Potência a dissipar (W)	Temperatura máxima do sistema actual (°C)	Temperatura máxima com alteração 1 (°C)	Temperatura com alteração 2 (°C)	Temperatura com alteração 3 (°C)
55.2	84.2	75.6	74.6	84.8

5. Melhoramentos estruturais

A resistência mecânica do sistema, nomeadamente aos ciclos térmicos que lhe são impostos, é muito importante para a longevidade e fiabilidade do sistema. Por isso, apesar de não ter sido definido como um objectivo primário, foi realizada alguma pesquisa sobre esta problemática e foram encontradas algumas soluções passíveis de serem aplicadas ao CPV em estudo.

O principal ponto crítico abordado será a união da placa de circuito ao dissipador, devido à natureza do material utilizado na união. O material utilizado para a união da placa de circuito é um adesivo termocondutor, constituído por uma resina epoxy misturada com partículas de prata. Para conhecer possíveis problemas associados a este tipo de adesivos, foi realizada uma pesquisa na literatura.

Num estudo realizado por Falat *et al* [27], uma amostra de epoxy misturada com partículas de prata sofre alguns testes para determinar qual a condutividade térmica logo após a cura do polímero, e qual a condutividade térmica após a relaxação das tensões resultantes do processo de cura. O autor chega à conclusão que a condutividade térmica do polímero, após o relaxamento das tensões, cai para cerca de metade. Estas conclusões são particularmente importantes, pois indicam que há uma alteração substancial das propriedades térmicas do adesivo ao longo do seu tempo de vida. Seria recomendável efectuar um estudo semelhante para o adesivo utilizado, para aferir se este comportamento se verifica.

A substituição do adesivo por outro material será um ponto importante em alterações futuras ao sistema, mas existem algumas barreiras a ter em conta: A grande área a unir, a limitação de temperatura a que a célula pode ser sujeita sem se danificar, a utilização de materiais dissimilares para o dissipador (alumínio) e para a metalização da placa de circuito (cobre), a resistência à fadiga térmica, elevada condutividade térmica e facilidade de aplicação à escala industrial.

Foram investigadas algumas possibilidades que poderão ser mais fiáveis do que a epoxy e eliminar a necessidade de fixação mecânica. Estes processos foram idealizados tendo em conta as barreiras descritas acima e considerando as limitações/possibilidade de implementação industrial.

5.1. Brasagem utilizando reacções químicas exotérmicas

A utilização de reacções químicas exotérmicas para efectuar a brasagem dos componentes poderá ser vantajosa porque permite uma entrega térmica muito localizada, não necessita de uma fonte de calor externa (só uma fonte de ignição) e não requer equipamentos dispendiosos.

Da pesquisa efectuada pode-se idealizar dois tipos de reacções exotérmicas susceptíveis de serem utilizadas. A formação de compostos intermetálicos de titânio e alumínio e as reacções de aluminotermia (reacção redox).

As lâminas reactivas são constituídas por camadas nanométricas de titânio e alumínio, dispostas de forma alternada e tipicamente apresentam uma espessura total entre os 40µm e os 100µm. Estas lâminas reagem exotermicamente quando se inicia a difusão atómica entre as várias camadas que as constituem. Esta reacção necessita de energia de activação que pode ser fornecida através de um pulso de laser, uma faísca, pulso eléctrico ou um filamento incandescente. A energia libertada durante a reacção vai provocar a fusão da liga de brasagem que envolve a lâmina, unindo assim os componentes a soldar [28]. Esta técnica permite uma entrega térmica muito localizada, libertando energia suficiente para fundir a liga de brasagem mas sem aquecer significativamente os componentes a soldar. Na Figura 5.1 encontra-se uma representação esquemática da evolução da reacção.

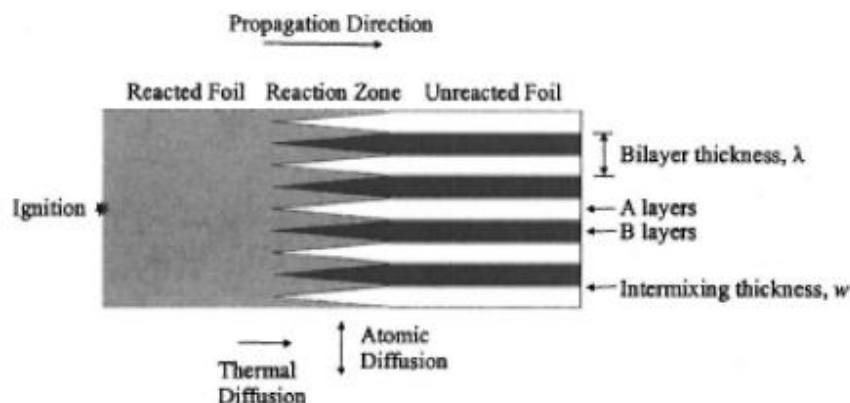


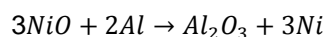
Figura 5.1 – Representação esquemática do andamento da reacção exotérmica. Após a ignição, a reacção propaga-se ao longo da lâmina formando um composto intermetálico [28].

Estas lâminas reactivas encontram-se disponíveis comercialmente sob a designação de NanoFoil®. A sua disponibilidade comercial é relevante para a aplicação industrial, pois é um produto que já está desenvolvido e a sua implementação seria por isso facilitada.

Na literatura está descrito por He *et al* [29] a aplicação desta técnica na união de componentes de um CPV. Esta abordagem foi testada pelos autores com vista a obter uma menor resistência térmica no sistema de dissipação de calor, nomeadamente na ligação entre a placa de circuito e o dissipador. É testada a fiabilidade e condutividade térmica da união pelo processo NanoBond® comparativamente com os resultados obtidos utilizando epoxi, sendo os de NanoBond® superiores aos da epoxi.

Após investigada a abordagem com NanoFoil®, uma outra com base em reacções exotérmicas foi investigada. As reacções de aluminotermia consistem na oxidação do alumínio por outro óxido metálico de um metal mais nobre do que o alumínio

A reacção do alumínio com o óxido de níquel é exotérmica, e durante a reacção destes dois compostos há formação de níquel fundido, que pode agir como agente de brasagem. A estequiometria da reacção completa é a seguinte [30]:



Poderão ainda ocorrer outras reacções que não serão abordadas neste trabalho.

O níquel (como produto da reacção) foi escolhido devido a ser resistente à corrosão atmosférica, apresentar uma condutividade térmica razoável (83W/m.K) e ser frequentemente utilizado em revestimentos [31].

5.1.1. Experiência de soldadura utilizando aluminotermia

Como os materiais necessários a esta abordagem se encontravam disponíveis e a mesma era relativamente simples de testar, decidiu-se fazer uma experiência prévia para tentar unir a placa de circuito ao dissipador.

Foi feita uma primeira tentativa de ignição, para confirmar a ocorrência da reacção, que foi bem sucedida. Após este teste, em que a reacção foi rápida e violenta, tentou criar-se uma forma de controlá-la utilizando um agente retardante. O agente utilizado foi a alumina (Al_2O_3), pois a adição de um produto de reacção provoca um deslocamento da reacção no sentido dos reagentes, com vista a diminuir a velocidade de reacção. Os reagentes foram colocados sobre uma placa de alumínio, sendo iniciada a reacção através da utilização de uma fita de magnésio. A fita de magnésio é utilizada como iniciador da reacção pois arde a mais de 1000°C [32], que está na gama de temperaturas para as quais a reacção de aluminotermia pode ser iniciada. Apesar da reacção poder atingir temperaturas elevadas, recorrendo a menores quantidades de reagentes as temperaturas poderão ficar dentro dos limites aceitáveis para o sistema.

Na tabela 5.1, estão registados os dados referentes a quantidade de reagentes utilizados.

Tabela 5.1 – Percentagem de agente retardante na mistura de termite.

Massa de termite (g)	Massa de alumina (g)	Percentagem de alumina na mistura (%)	Nome da amostra
3,03	0,00	0.0	A
3,06	0,31	10.1	B
3,00	0,60	20.0	C
3,40	1,10	32.4	D
3,09	1,21	39.2	E
3,01	1,50	49.8	F

Após testar as amostras da tabela 5.1 foram observados os resultados das reacções. A amostra A reagiu rapidamente e com alguma violência, produzindo pequenas esferas. Na Figura 5.2 apresenta-se o aspecto dos produtos de reacção.

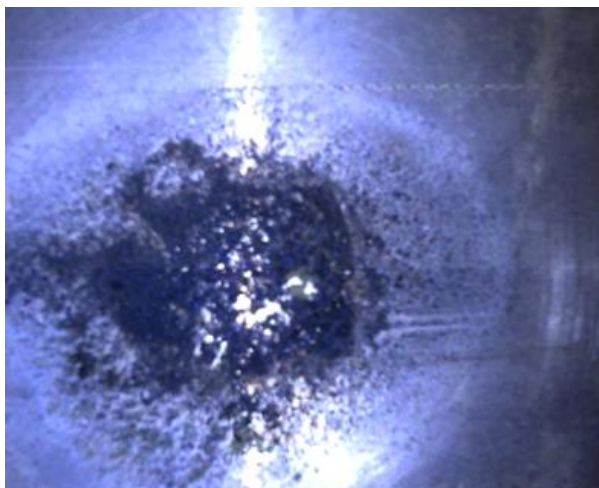


Figura 5.2 – Aspecto do produto de reacção da amostra A.

A amostra B reagiu mais lentamente do que a amostra A, produzindo esferas ligeiramente maiores do que na amostra A

A amostra C reagiu ainda mais lentamente do que as amostras A e B, produzindo esferas de dimensões superiores às produzidas por A e B. No entanto, a reacção foi incompleta. Na Figura 5.3 é visível o produto de reacção da amostra C



Figura 5.3 – Aspecto do produto de reacção da amostra C. É possível observar uma zona branca, correspondente ao óxido de magnésio formado na combustão do magnésio.

Quanto às amostras D, E e F não houve reacção, possivelmente porque o agente retardante inibiu a reacção de aluminotermia.

Durante a experiência, verificou-se que não houve adesão do metal formado à placa de alumínio onde decorreu a reacção, para todas as amostras. A diferença de tamanho dos aglomerados produzidos pode dever-se ao maior tempo de reacção, que permite a difusão do metal líquido e o consequente crescimento dos agregados.

Após estes resultados, resolveu-se tentar a união da placa de circuitos ao dissipador, utilizando estanho como metal de brasagem. Para efectuar a experiência recorreu-se a termite sem agente retardante, colocada entre duas folhas de estanho. Estes materiais foram colocados entre a alumina e o dissipador e colocou-se um peso entre os 4kg e os 6kg sobre o conjunto. A ignição foi feita recorrendo a fita de magnésio. Após a ignição da mistura, verificou-se que esta se propagou na junta, apesar de ter sido incompleta.

A alumina fracturou durante o processo e o metal formado durante esta reacção, apresentava-se sob a forma de pequenas esferas, não coesas. O metal de brasagem fundiu, e a metalização presente na parte superior da alumina também fundiu. O metal de brasagem aderiu à alumina, mas não aderiu ao dissipador, não se formando uma união entre os dois componentes.

O estado em que ficaram os componentes após a tentativa de soldadura pode ser observado na Figura 5.4.

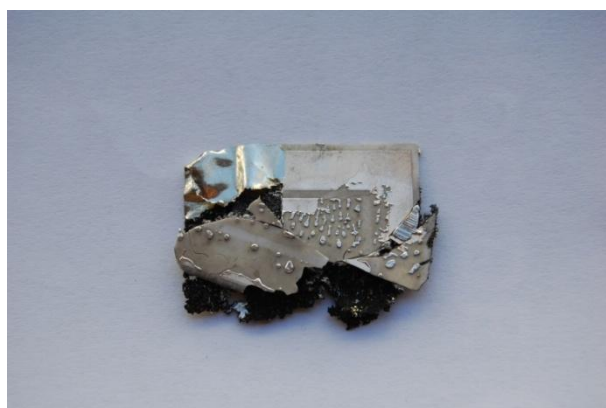
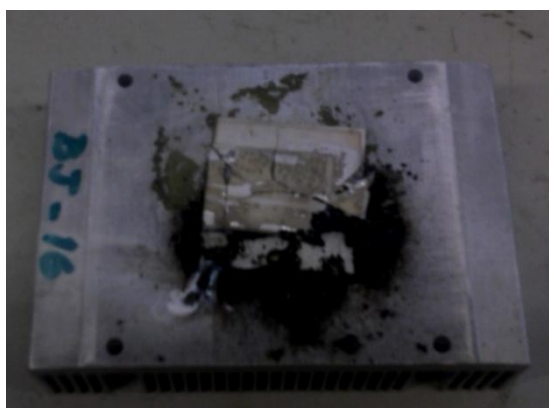


Figura 5.4 - Componentes após tentativa de soldadura. É possível ver que a placa de circuitos ficou completamente inutilizada. Na face da placa de circuitos é visível que a metalização fundiu e que a reacção foi incompleta, devido à presença de material de brasagem não fundido.

Após estes resultados pouco promissores, decidiu-se não continuar com os ensaios experimentais.

Os principais problemas detectados foram a descoesão entre os grãos de metal formados durante a reacção química e a falta de molhagem das superfícies a soldar por parte dos mesmos. Uma possível explicação para este fenómeno poderá ser a segregação da alumina formada durante a reacção para a superfície do metal fundido. A alumina na superfície poderá evitar que o metal fundido entre em contacto com as superfícies a molhar, incluindo outros aglomerados formados durante a reacção, provocando assim a descoesão dos produtos de reacção. Quanto à reacção ter sido incompleta, tal pode ter sucedido devido a uma mistura heterogénea dos seus constituintes, a temperatura atingida não ter sido suficiente para a reacção progredir ou a mistura não estar devidamente compactada. Quanto à destruição da placa de circuito, ter-se-á devido à utilização de reagentes em excesso.

5.2. Processos de soldadura

Na literatura, foram investigadas algumas formas de soldar a placa de circuitos ao dissipador, procurando maximizar a eficiência do processo e minimizar a influência do processo nos componentes a soldar. Uma ideia que surgiu tendo em conta estas duas premissas foi aproximar a fonte de calor o máximo possível da liga de brasagem reduzindo assim a entrega térmica e os problemas mecânicos associados aos processos de soldadura, como empenos e distorções dimensionais. Foram então investigados processos que permitissem um aquecimento localizado.

Devido à área a unir ser grande e não estar exposta, dois processos surgiram como boas opções: soldadura por indução magnética e soldadura por microondas.

A soldadura por indução magnética baseia-se no aquecimento de um metal através da aplicação de um campo magnético alterno ao mesmo. Este campo magnético é produzido por uma bobine, onde é aplicado um sinal eléctrico de alta frequência. O aquecimento do metal pode ter a contribuição de dois fenómenos: No caso dos materiais ferromagnéticos o aquecimento advém, por um lado, das correntes de Eddy que vão ser induzidas no material e que o farão aquecer por efeito de Joule, por outro lado, a histerese magnética provocada pelo campo magnético alterno vai também contribuir para o aquecimento. No caso dos materiais paramagnéticos o aquecimento deve-se quase exclusivamente às correntes de Eddy e ao efeito de Joule [33]. Este método tem ainda a vantagem de não necessitar de contacto físico entre a bobine e as peças a soldar.

Na literatura encontrou-se uma abordagem à soldadura de componentes electrónicos utilizando soldadura por indução magnética. Nesta abordagem são utilizadas nanopartículas magnéticas de uma liga de ferro cobalto misturadas com uma pasta de soldadura à base de estanho. Estas nanopartículas vão agir como fonte de calor quando sujeitas a um campo magnético alterno, devido à histerese magnética sofrida pelas mesmas e provocar a fusão da pasta de soldadura. Deste modo, a fonte de calor encontra-se misturada com o material de soldadura [34]. No entanto, esta abordagem é ainda experimental, pelo que seria necessário testar as juntas soldadas para verificar a aplicabilidade ao sistema CPV.

Na soldadura através de microondas, utiliza-se radiação electromagnética para aquecer os materiais a unir. Tal acontece devido à histerese dieléctrica, resultante da interacção da radiação electromagnética com dipolos eléctricos presentes no material. Na literatura foi também encontrada uma abordagem à soldadura de componentes electrónicos utilizando microondas como fonte de calor [35]. Esta abordagem é semelhante à descrita para a indução magnética, mas com uma diferença. Em vez de serem utilizadas partículas ferromagnéticas, são utilizados materiais sensíveis às microondas.

O objectivo de ambas as abordagens encontradas acaba por ser muito semelhante, diferindo nos materiais e equipamentos a utilizar.

Não foi possível testar nenhuma destas abordagens, porque em tempo útil não foi possível encontrar aparelhos de indução magnética ou de soldadura por microondas disponíveis para realizar estes testes.

6. Protótipo termo fotovoltaico

A maior parte da energia solar que chega ao sistema CPV é dissipada sob a forma de calor. A quantidade de energia não aproveitada depende directamente da eficiência de conversão da célula:

$$P_{dissipada} = P_{incidente} - \eta_{célula} \times P_{incidente} \quad (23)$$

O aproveitamento de parte desta energia que não é convertida iria aumentar a potência produzida e a eficiência do sistema. Actualmente os dispositivos candidatos a esta aplicação são os dispositivos termoeléctricos, pois convertem o calor directamente em energia eléctrica. Estes dispositivos são isolantes térmicos, pelo que a sua integração tem que garantir que se consegue escoar o calor. Tal seria feito por um sistema de transporte/dissipação de calor utilizando *heat pipes*. Os *heat pipes* são permutadores de calor passivos e com uma grande capacidade de transportar calor. No protótipo construído, o sistema de transporte/dissipação do calor irá consistir num sistema de arrefecimento activo em circuito fechado.

Ao longo deste capítulo será descrito o projecto de um protótipo de um sistema de concentração termo fotovoltaico utilizando dispositivos termoeléctricos para aproveitar o calor e *heat pipes* para dissipar a potência não aproveitada. Será também descrita a construção do protótipo construído.

O dispositivo idealizado é diferente do dispositivo construído, devido à escassez de meios não permitir a utilização de alguns componentes necessários à construção. Como não foi possível utilizar *heat pipes*, recorreu-se a um sistema de refrigeração activo, utilizando uma pequena bomba de aquário para fazer circular o fluido de arrefecimento (água) no sistema.

6.1. Protótipo idealizado

O dispositivo idealizado apresenta um sistema de dissipação passivo, porque este iria apresentar vantagens em termos de longevidade e de manutenção. Na sua construção seriam utilizados *heat pipes* porque estes apresentam uma grande capacidade de transporte de calor, necessária para escoar a maior parte do calor gerado.

O protótipo seria constituído por 4 partes: uma placa de circuitos (semelhante à utilizada actualmente), um sistema de dissipação passivo com *heat pipes*, um dispositivo termoeléctrico e um dissipador extrudido. A união dos diferentes componentes seria feita recorrendo a ligas de brasagem e/ou adesivos.

O sistema idealizado está representado na Figura 6.1 e 6.2.

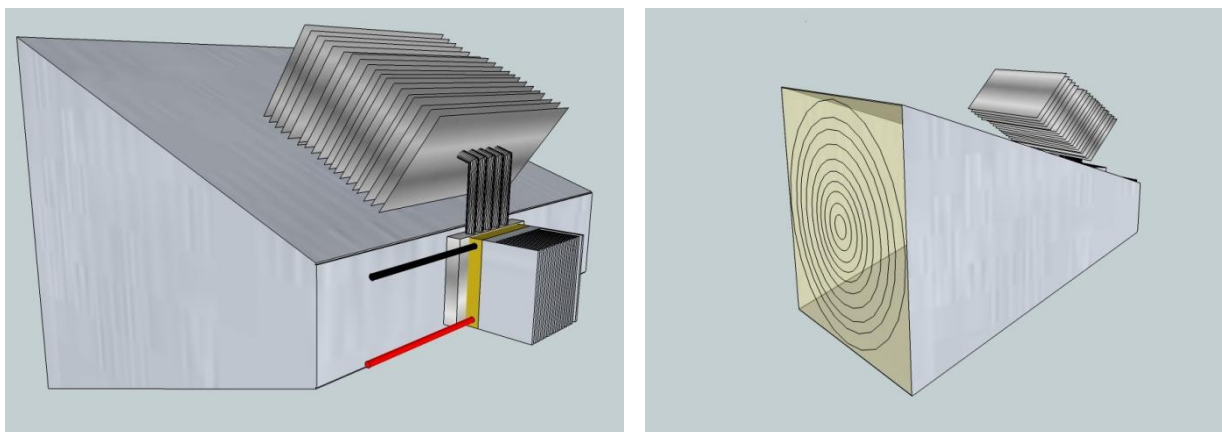


Figura 6.1 - Aspecto geral da integração do protótipo no sistema de concentração.

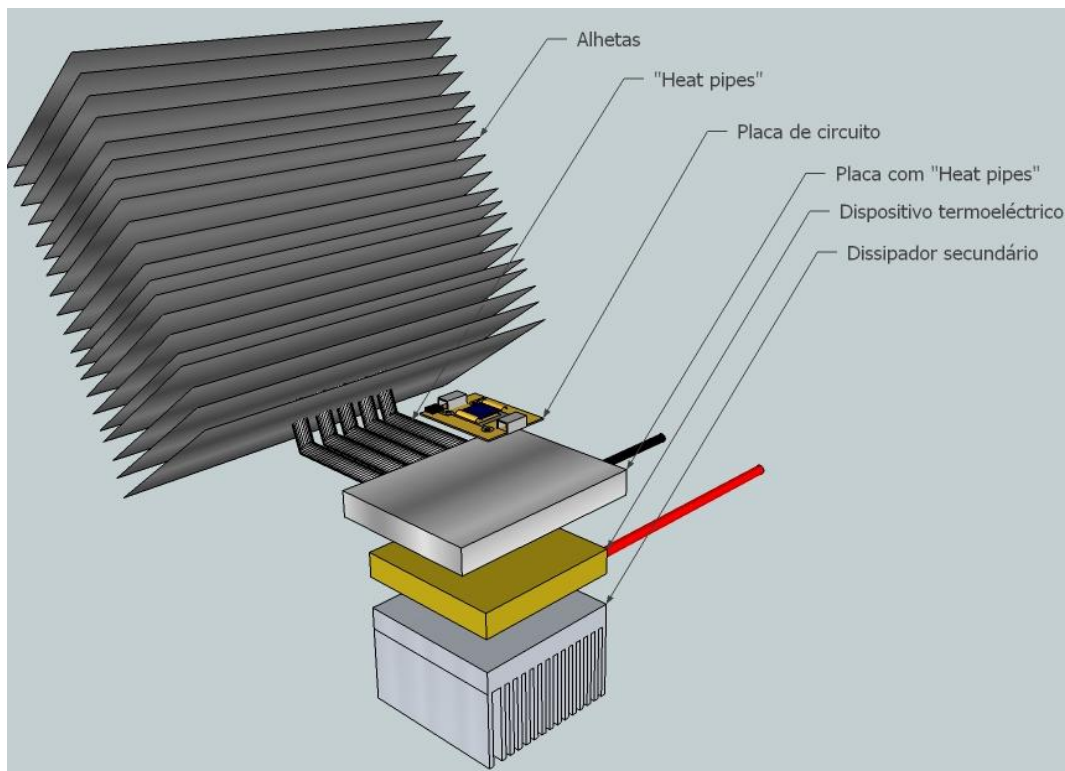


Figura 6.2 – Constituição do sistema idealizado.

Na Figura 6.2 é possível observar a constituição do sistema idealizado. A integração do termoeletrico, como já referido, teria que ser feita de modo a que este não bloqueasse a dissipação de calor. Seria então colocado na parte inferior da placa com *heat pipes*. O dissipador secundário serve para arrefecer o dispositivo termoeletrico, aumentando a ΔT a que o termoeletrico está sujeito e consequentemente a potência produzida pelo mesmo. Os *heat pipes* iriam transportar a maior parte do calor, que seria dissipado nas alhetas.

6.1.1. Estimativas para o protótipo idealizado

Recorrendo às resistividades térmicas e dimensões dos diversos materiais presentes no sistema, tentou fazer-se uma estimativa das temperaturas atingidas pela célula. A resistência térmica dos *heat pipes* foi retirada das especificações do fabricante. A potência produzida pelo termoeletrico foi estimada recorrendo a uma folha de cálculo disponibilizada pelo fabricante de módulos Hi-Z.

Utilizando a metodologia para cálculo da resistividade térmica total apresentada no ponto 2.6, foi estimada a resistividade térmica do sistema idealizado. A representação esquemática do fluxo de calor neste sistema pode ser observada na Figura 6.3.

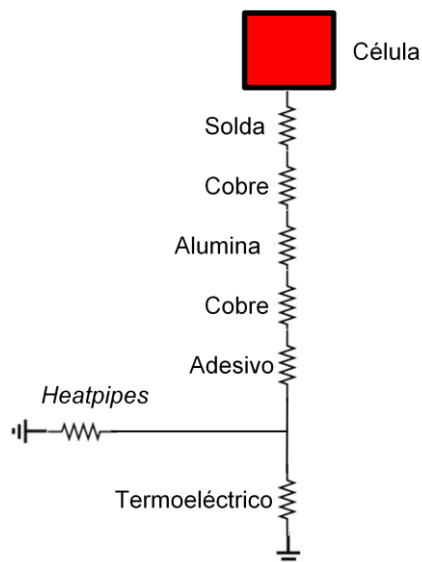


Figura 6.3 - Esquema representativo do fluxo de calor e a resistividade oferecida pelos diferentes componentes.

Na Tabela 6.1, encontram-se as características dos materiais que seriam utilizados no sistema. É de notar que a resistividade térmica do dispositivo termoelectrico é várias ordens de grandeza superior à resistividade dos restantes constituintes.

Tabela 6.1 – Dimensões, condutividade e resistividade térmicas dos diferentes constituintes do sistema.

Material	Área (m ²)	Espessuras (m)	Condutividade (W/m.K)	Resistividade térmica (K.m ² /W)
Célula	1.00x10 ⁻⁰⁴	1.80x10 ⁻⁰⁴	-	-
Solda	1.00x10 ⁻⁰⁴	5.00x10 ⁻⁰⁵	5.00x10 ⁰¹	1.00x10 ⁻⁰⁶
Cobre	1.00x10 ⁻⁰⁴	1.00x10 ⁻⁰⁴	4.01x10 ⁰²	2.49x10 ⁻⁰⁷
Alumina	2.50x10 ⁻⁰³	5.00x10 ⁻⁰⁴	2.40x10 ⁰¹	2.08x10 ⁻⁰⁵
Cobre	2.50x10 ⁻⁰³	1.00x10 ⁻⁰⁴	4.01x10 ⁰²	2.49x10 ⁻⁰⁷
Adesivo	2.50x10 ⁻⁰³	1.00x10 ⁻⁰⁴	2.90x10 ⁰¹	3.45x10 ⁻⁰⁶
Heat pipes	6.03x10 ⁻⁰⁴	3.00x10 ⁻⁰¹	6.22x10 ⁰⁴	4.83x10 ⁻⁰⁶
Termoelectrico	2.25x10 ⁻⁰⁴	4.00x10 ⁻⁰³	1.17x10 ⁰¹	2.92x10 ⁰¹

A resistividade térmica do sistema resultará da soma das diferentes resistividades, tendo em conta que para os elementos que se encontram em “paralelo” se soma o inverso das resistividades, à semelhança do que acontece com a corrente eléctrica. Na Tabela 6.2 encontra-se a resistividade térmica total do sistema (excluindo a resistividade térmica dos dissipadores).

Tabela 6.2 - Resistividade térmica total até aos dissipadores.

Resistividade térmica até às alhetas dos <i>heat pipes</i> (K.m ² /W)	Resistividade térmica do Termoelectrico (K.m ² /W)	Resistividade térmica total (K.m ² /W)
3.06x10 ⁻⁰⁵	29.17	3.06x10 ⁻⁰⁵

Como a quase totalidade do calor vai ser escoado pelos heat pipes, a resistividade térmica do termoelectrico é desprezável, como se pode observar na Tabela 6.2.

Recorrendo ao modelo idealizado, calculou-se os valores de ΔT teóricos atingidos durante o funcionamento do protótipo. Os resultados serão apresentados na

Tabela 6.3, em conjunto com os dados obtidos experimentalmente que servem como termo de comparação. A área de dissipação considerada é de cerca de 0,256 m² (o dobro da área actual) que corresponderiam a 20 alhetas de 8cm por 16cm e o coeficiente de transferência térmica do dissipador para o ar assumido é igual ao determinado para o sistema actual.

Tabela 6.3 - Variação de temperatura estimada versus dados experimentais.

Potência a dissipar (W)	ΔT (°C)	ΔT actual (°C)
7.89	5.4	7.9
15.78	10.3	15.1
23.67	15.0	21.9
31.56	19.6	28.1
39.45	24.1	33.3
47.34	28.5	38.9
55.23	32.8	44.2
63.12	37.1	49.9
71.01	41.3	55.4
78.90	45.5	60.8

Analisando a Tabela 6.3, é possível observar que a temperatura estimada está abaixo da temperatura actual do sistema. Contudo, é necessária a avaliação do sistema na prática para confirmar estes valores, pois são uma aproximação grosseira, baseada num sistema muito diferente.

Para o dispositivo termoeléctrico optimizado estima-se que gere uma energia 0,6W para um ΔT de 30°C, segundo dados do fabricante. Tal corresponderia a um aumento de eficiência do sistema de 1,5% devido à integração do termoeléctrico, sem contar com o aumento da eficiência resultante de uma menor temperatura de operação da célula solar, que rondará 0.6%, segundo dados do fabricante.

6.2. Protótipo construído

O dispositivo construído é um pouco diferente do idealizado. Como não havia possibilidade de utilizar *heat pipes* foi feita outra abordagem ao problema: em vez de um sistema de arrefecimento passivo, construiu-se um sistema de arrefecimento activo. A placa com *heat pipes* foi substituída por uma placa de arrefecimento em que irá circular água para arrefecer o sistema.

6.2.1. Construção do protótipo

Para garantir um bom contacto térmico entre os diversos componentes, foi utilizada uma massa térmica (*Wakefield* 120-8), com uma condutividade térmica de 0.74 W/m.K. Como esta massa térmica não providenciava fixação mecânica, esta foi conseguida através de outros métodos.

Começou-se por revestir ambas as faces da placa de arrefecimento que iriam ficar em contacto com a tubagem para arrefecimento, como apresentado na Figura 6.4.

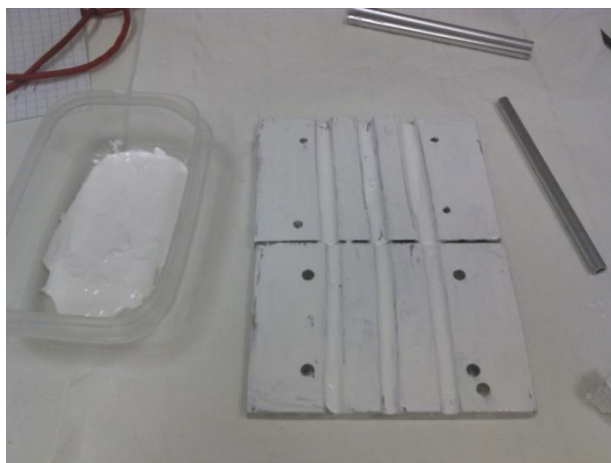


Figura 6.4 – Placa de arrefecimento em construção. Ambas as faces que estarão em contacto com a tubagem foram revestidas com massa térmica, para garantir um fluxo de calor elevado e uniforme.

Foram também feitos quatro furos em cada face, para permitir a junção de ambas as faces. Na Figura 6.5 encontra-se a placa de arrefecimento já montada.



Figura 6.5 – Placa de arrefecimento. São visíveis os tubos por onde irá passar o líquido refrigerante.

Na Figura 6.6 pode observar-se a placa de arrefecimento acoplada ao dispositivo termoelétrico e ao dissipador. O dissipador vai ter como função aumentar a diferença de temperatura a que o dispositivo termoelétrico está sujeito, aumentando assim a energia produzida pelo mesmo.



Figura 6.6 – Placa de arrefecimento acoplada ao termoelétrico e ao dissipador. Entre cada um dos componentes foi colocada massa térmica, de modo a maximizar o fluxo de calor. A união destes componentes foi feita através da utilização de abraçadeiras de serrilha.

Na Figura 6.7 encontra-se o protótipo já montado, com as tubagens ligadas e com potência aplicada à célula.

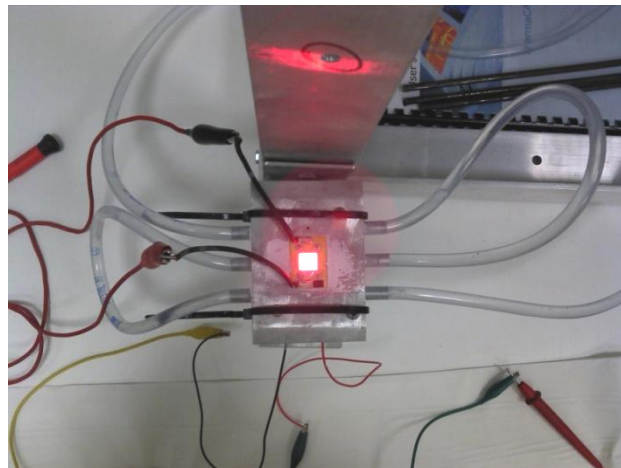


Figura 6.7 – Protótipo em funcionamento.

A água utilizada como fluido refrigerante, é armazenada num reservatório de plástico, e é bombeada através do sistema por uma pequena bomba de água com uma potência de 6W. O fluxo de água através do sistema é de 0.54 l/m. Na Figura 6.8 encontra-se uma imagem do protótipo em funcionamento, bem como o circuito de refrigeração e reservatório de água.

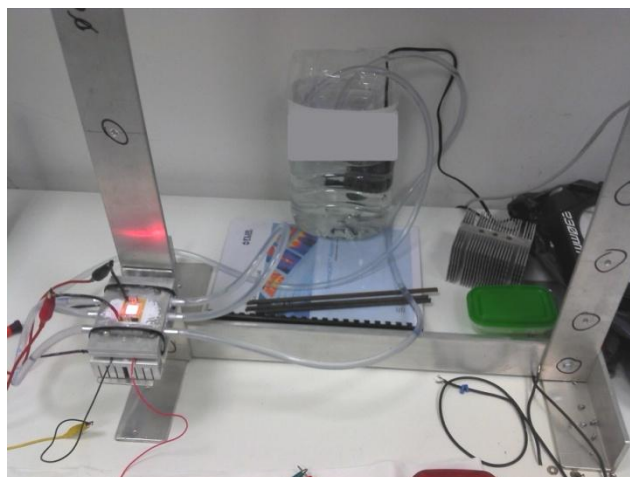


Figura 6.8 – Protótipo com circuito de refrigeração. Ao centro pode observar-se o reservatório de água.

6.2.2. Resultados em funcionamento simulado

O protótipo construído foi testado em condições laboratoriais, com a célula ligada em polarização directa a servir de fonte de calor. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.4 e na Tabela 6.5. As diferenças de temperatura medidas (ΔT) correspondem à diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura da célula. O objectivo da medição deste parâmetro é eliminar a influência da temperatura ambiente.

Tabela 6.4 – Temperatura atingida pela célula versus a potência a dissipar.

Potência a dissipar (W)	ΔT da célula no protótipo (°C)	ΔT da célula no sistema actual (célula sem prisma) (°C)	Diferença (°C)	Diferença (%)
7.9	2.7	8.3	5.6	67.5
15.8	4.2	14.2	10	70.4
23.7	5.7	19.6	13.9	70.9
31.6	9.3	25	15.7	62.8
39.5	11.1	30.3	19.2	63.4
47.3	12.3	35.2	22.9	65.1
55.2	15.7	40.4	24.7	61.1
63.1	17.5	44.9	27.4	61.0
71	22.4	49.4	27	54.7
78.9	25.5	53.9	28.4	52.7

Na Tabela 6.4, é possível observar que a temperatura da célula quando inserida no protótipo é substancialmente inferior à temperatura da célula quando inserida no sistema actual. A resistividade térmica total do sistema situa-se nos 0.28 °C/W.

Tabela 6.5 – Resultados obtidos durante o funcionamento do dispositivo termoelectrico

Potência a dissipar (W)	Temperatura da célula (°C)	ΔT Termoelectrico (°C)	Tensão (mV)	Corrente (mA)	Potência gerada (mW)
7.9	28.0	0.4	0.5	1.0	0.0
15.8	29.8	1.2	23.0	5.7	0.1
23.7	32.0	1.6	42.0	10.8	0.5
31.6	34.5	2.4	46.0	11.9	0.5
39.5	36.7	3.0	66.6	14.4	1.0
47.3	39.4	4.0	70.9	17.7	1.3
55.2	42.0	5.2	93.8	22.3	2.1
63.1	45.4	6.1	110.3	25.1	2.8
71.0	48.6	6.1	140.2	34.5	4.8
78.9	50.8	7.0	163.4	40.8	6.7

Os valores da potência produzida pelo dispositivo termoelectrico apresentados na Tabela 6.5 são bastante reduzidos, resultado da baixa eficiência do termoelectrico utilizado bem como da baixa diferença de temperatura a que está sujeito.

Como este protótipo apresenta uma capacidade de dissipação de calor bastante acima do sistema actual, resolveu-se testar o mesmo para uma carga térmica elevada. Para tal, foram aplicados 160 W à célula durante 30 min. As temperaturas no sistema ao fim de 30 min encontram-se na Figura 6.9.



Figura 6.9 - Protótipo a funcionar com uma potência injectada de 160W. A potência a dissipar sob a forma de calor corresponderá a cerca de 126W.

Após 30 min a operar a 160W, a célula atingiu uma temperatura máxima de 69°C. Estes resultados são promissores, pois a potência térmica aplicada corresponde a mais do dobro da potência térmica a que a célula está sujeita em funcionamento (cerca de 51W), pelo que o funcionamento deste sistema com o dobro da concentração solar (1600x) parece ser viável.

Também se pode observar que a temperatura do fluido de arrefecimento é superior à temperatura ambiente. Isto deve-se à falta de um radiador no sistema para arrefecer o líquido refrigerante.

7. Discussão de resultados e perspectivas futuras

7.1. Parâmetros em estudo

Os parâmetros estudados durante a caracterização térmica do sistema foram escolhidos devido à simplicidade de teste e à relevância da informação obtida. Permitiram conhecer algumas das limitações do sistema, bem como prever o seu funcionamento em condições reais.

O encapsulamento (e utilização do prisma) é um factor que tem uma influência moderada na temperatura que a célula atinge. O cenário termicamente mais favorável é a não utilização de qualquer encapsulamento ou sistema óptico em contacto directo com a célula. Obviamente que a falta do encapsulamento irá facilitar a corrosão do sistema, e consequente redução no rendimento da célula. A situação ideal seria utilizar adesivos termocondutores transparentes e um prisma com uma condutividade térmica elevada, mas actualmente tal tecnologia não existe, ou é demasiado dispendiosa.

O ângulo a que o CPV se encontra parece não ser um parâmetro muito significativo. Isso pode ser benéfico em futuros estudos térmicos, pois é menos uma variável a ter em conta. No entanto, durante a fase de concepção de novos sistemas de dissipação, é necessário ter em atenção este parâmetro com vista à optimização da circulação de ar no dissipador.

A homogeneidade das amostras foi também importante para este estudo. O facto de as amostras serem bastante homogéneas em termos de resistividade térmica é benéfico, pois permite que os modelos criados sejam aplicáveis às várias amostras produzidas.

O vento revelou-se um factor muito relevante nestes estudos, produzindo reduções de 50% a 60% na temperatura máxima atingida, para uma velocidade de vento que se situa entre os 3 e os 4 km/h (ou entre 0.84 m/s e 1.1 m/s). Este cenário pode ser considerado um cenário ideal, pois o vento circula entre as alhetas com facilidade, mas se o vento incidir lateralmente no CPV, o resultado poderá ser diferente. Em futuros estudos seria interessante analisar o comportamento térmico do CPV em condições de funcionamento real, para várias condições de vento, de modo a conhecer o comportamento térmico real do mesmo.

7.2. Modelo e Melhorias

O modelo criado para prever o comportamento da célula é bastante simples, mas apesar da sua simplicidade, é preciso o suficiente para prever a temperatura máxima a que a célula irá estar sujeita. Uma melhoria que poderá ser feita a este modelo, será acrescentar outras variáveis como o tempo, velocidade do vento, humidade entre outras, mas para tal será necessário uma modelação computacional mais pesada e complicada. Esta melhoria poderia ajudar na simulação das condições encontradas na realidade, facilitando assim o desenvolvimento de novas soluções.

Quanto às alterações propostas para melhorar a dissipação de calor, a substituição do material da placa de circuitos por nitreto de alumínio trará uma redução da diferença de temperatura máxima atingida em 20%. Espera-se que esta alteração diminua a temperatura máxima atingida em 8.6°C e aumente o rendimento em cerca de 0,4%. O grande obstáculo à implementação desta alteração será o preço mais elevado do nitreto de alumínio em relação à alumina.

A alteração do processo de união da placa de circuitos ao dissipador é um dos pontos a rever no actual sistema. Apesar de a alteração do material na interface dissipador/placa de circuitos não produzir resultados muito significativos em termos térmicos, os benefícios a nível estrutural que esta alteração pode trazer justificam que seja considerada. O adesivo é susceptível de se degradar com o tempo e além disso o seu tempo de vida não é conhecido. Contrariamente o comportamento e tempo de vida das ligas à base de estanho estão bem documentados.

Para que a alteração do processo de união seja viável, o processo de fusão da liga de brasagem deve ser o mais rápido, eficiente e localizado para garantir uma produtividade e qualidade máximas. O processo de soldadura utilizando aluminotermia testado não é viável sem que haja uma formulação ideal da mistura (física e química). Quanto ao processo de soldadura utilizando *Nanofoils*®, que não pôde ser testado devido ao preço das mesmas, poderá ser testado em trabalhos futuros. Devido ao elevado preço que as *Nanofoils*® apresentam actualmente, os processos de soldadura que se apresentam como os mais propensos à implementação são: a soldadura por microondas e a soldadura por indução magnética.

Durante a execução deste trabalho não foi possível testar a maioria dos processos de soldadura devido a restrições nos equipamentos disponíveis, mas em trabalhos futuros será interessante averiguar a viabilidade destas soluções.

7.3. Protótipo

7.3.1. CPV idealizado

O protótipo idealizado seria construído com um sistema de arrefecimento passivo, permitindo a integração de um dispositivo termoelétrico na sua estrutura sem que este afectasse a dissipação de calor. O sistema de arrefecimento passivo seria construído utilizando *heat pipes* para transportar o calor da placa de arrefecimento, onde se encontraria a célula, para o dissipador (alhetas). Na literatura, *Anderson et al* [36] descrevem a construção de um dispositivo de arrefecimento com *heat pipes* para aplicação em dispositivos CPV, o que indica que a utilização de arrefecimento passivo recorrendo a *heat pipes* é viável. Foi também encontrado um sistema modular de arrefecimento para a indústria dos CPV's que utiliza *heat pipes* para dissipar o calor [37], confirmando assim o interesse desta solução. Além disso, a produção em larga escala de dissipadores baseados na utilização de *heat pipes* já é realizada, pois estes são amplamente utilizados na indústria electrónica, em particular no arrefecimento de processadores.

O aumento de eficiência do CPV projectado seria reduzido (à volta de 2%) e a curto prazo a sua implementação pode não ser viável economicamente. No entanto, apesar da potência produzida pelo termoelétrico e a sua eficiência serem muito baixas, há uma grande aposta no desenvolvimento de dispositivos termoelétricos. É portanto de esperar que a curto prazo apareçam dispositivos mais eficientes e se torne viável a sua aplicação.

Há ainda a possibilidade de utilizar um sistema de arrefecimento utilizando *heat pipes* sem a integração de um dispositivo termoelétrico, de modo a reduzir a temperatura de funcionamento do sistema, aumentando assim a eficiência do mesmo em cerca de 0.55% e evitando os custos associados ao termoelétrico.

As vantagens que este protótipo apresentaria sobre o actual sistema seriam:

- Diminuir a temperatura da célula em funcionamento, por refrigeração da mesma com *heat pipes* e uma maior área de dissipação de calor para o ar.
- Aumentar a eficiência global do sistema CPV, devido ao aproveitamento do calor pelo dispositivo termoelétrico e também devido à diminuição da temperatura de serviço
- A convecção natural seria favorecida e o vento deixaria de ser um factor tão influente.
- A possibilidade do aumento do rácio de concentração.
- A fiabilidade seria melhor do que a de um sistema com arrefecimento activo.

As desvantagens que este protótipo apresentaria seriam:

- O custo dos materiais elevado, quando comparado com o sistema actual
- Fabrico complexo

7.3.2. CPV construído

O protótipo construído opera com um sistema de refrigeração activo, em que a água (liquido refrigerante) circula devido a uma bomba. A utilização de um sistema de arrefecimento activo foi a solução mais semelhante à utilização de *heat pipes* que se conseguiu implementar. Com este sistema foi possível concretizar o conceito que seria aplicado ao CPV idealizado, embora existam diferenças óbvias.

Este protótipo permite que a célula opere com um ΔT 60% inferior ao actual, e ainda permite obter 2.1 mW (dados das tabelas 6.4 e 6.5, para uma potência a dissipar de 55W). O aumento de eficiência da célula devido à redução de temperatura estimado situa-se nos 1.25% e é possível funcionar com rácios de concentração mais elevados do que os utilizados, devido ao arrefecimento mais eficaz. Estima-se que o sistema construído possa operar com um rácio de concentração de 1600x por longos períodos, desde que se refrigere a água que circula no sistema.

Neste protótipo de arrefecimento activo, para além de ser aproveitado algum calor utilizando o dispositivo termoelétrico, pode ainda aproveitar-se o calor removido pela água. Recorrendo a um

permutador de calor, é possível fazer um pré aquecimento de água ou outros fluidos aproveitando assim o calor que poderia ser utilizado para aquecimento (água, meio ambiente, etc.)

No entanto, esta configuração de arrefecimento activo possui desvantagens em termos de fiabilidade e custos. Se fosse aplicada ao sistema actual em que as células estão dispostas individualmente, iriam existir inúmeras conexões de tubagens, levando ao aumento da probabilidade de falha do sistema. Por outro lado, a utilização de tubagens e bombas para fazer circular o fluido iriam aumentar os custos de produção e aumentar a manutenção necessária ao sistema. Além disso, parte da potência gerada iria ser necessária para operar a bomba de fluido.

Em suma, a implementação desta solução (arrefecimento activo) requer uma análise dos custos e benefícios. Por um lado o aumento de eficiência e o aproveitamento do calor, por outros os custos associados ao fabrico e a manutenção do sistema. No futuro, este pode ser um estudo importante.

7.4. Perspectivas futuras

Apesar de o actual sistema CPV se encontrar numa fase de desenvolvimento avançada, é possível apontar algumas alterações que o poderão melhorar. A substituição do adesivo é uma das alterações que poderá trazer benefícios a nível estrutural. O estudo da aplicabilidade das soluções propostas neste trabalho pode ser um ponto de partida para a substituição do adesivo. Alguns problemas que poderão surgir durante o teste das soluções propostas são: O alumínio do dissipador pode ser difícil de molhar pela liga de brasagem; a própria liga pode ser pouco resistente à fadiga; a interface formada pode conter porosidades; entre outros problemas.

Outro ponto importante a rever é o dissipador. Como já referido, a utilização de *heat pipes* no sistema de dissipação pode trazer benefícios térmicos, consoante o desenho do dissipador. Actualmente, parece haver interesse neste tipo de sistemas por parte da indústria de CPV's, pois estes podem permitir a utilização de maiores rácios de concentração, diminuindo o custo por Watt do sistema e aumentando assim a competitividade dos sistemas CPV em relação a outras soluções. Mesmo que esta solução não seja seguida, o actual dissipador necessitará de ser revisto para que se possa aumentar o rácio de concentração e diminuir a temperatura a que o sistema se encontra.

A integração de dispositivos termoelectrónicos na estrutura dos CPV's, demonstrada durante este trabalho, pode também ser uma forma de aumentar a eficiência do sistema. No futuro, quando surgirem termoelectrónicos mais eficientes e com baixo custo, a fusão dos sistemas fotovoltaicos com os dispositivos termoelectrónicos poderá trazer grandes aumentos na eficiência do sistema. Por exemplo, se no actual sistema fosse integrado um termoelectrónico com 10% de eficiência e se todo o calor a dissipar passasse pelo mesmo (55 W), produzir-se-iam mais 5,5W de potência o que corresponderia a um aumento de eficiência do CPV à volta de 14%.

A utilização de sistemas de arrefecimento activo também se pode tornar útil. Nas regiões mais frias e com maiores latitudes, o calor retirado pelo líquido refrigerante pode ser utilizado no pré-aquecimento de água, ou pode até ser utilizado directamente para aquecer edifícios, abrindo assim novas possibilidades de instalação de CPV's. Outra possibilidade, no caso das grandes centrais fotovoltaicas, seria utilizar o calor retirado dos CPV's para pré-aquecer a água utilizada nas centrais termoelectricas, com o objectivo de diminuir a quantidade de combustível utilizado.

Na literatura foi ainda encontrada outra solução para aproveitar o calor retirado pelo fluido refrigerante. Kosmadakis *et al* [38] simularam a utilização de um sistema CPV em conjunto com um motor baseado no ciclo de Rankine em que o motor utiliza o calor proveniente dos CPV para produzir energia. Os autores estimam que esta solução pode aumentar a eficiência do sistema CPV em cerca de 10%, com uma diminuição do custo por Watt do sistema [38].

8. Conclusões

Estima-se que o CPV caracterizado opere entre 40 a 45°C acima da temperatura ambiente, na ausência de vento e para uma irradiância de 1000W/m². A resistividade térmica calculada é de 0.8 °C/W. Através do modelo criado, estima-se que a temperatura máxima de operação possa baixar 7 a 9°C e a resistividade térmica para 0.65°C/W substituindo o cerâmico da placa de circuitos por nitreto de alumínio com pelo menos 140W/m.K de condutividade térmica.

Quando sujeito a vento com uma velocidade entre os 3 e os 4 km/h (ou entre 0.84 m/s e 1.1 m/s) e direcção ideal, a diferença de temperatura atingida para uma irradiância de 1000W/m² é inferior em mais de 50%, ou seja cerca de 20°C à temperatura atingida sem vento. Por este motivo, o vento é um factor importante a ter em conta no projecto do CPV.

O encapsulamento é um factor com alguma influência na temperatura de operação. Para as condições testadas registaram-se 40°C, 44°C e 50°C acima da temperatura ambiente para a célula sem encapsulamento, célula com prisma e célula só com encapsulamento. Como só foi utilizada uma amostra para cada condição, seriam necessários mais testes para se poderem tirar conclusões concretas acerca deste parâmetro.

O modelo térmico criado ajusta-se bem aos resultados observados, e pode ser utilizado para estimar alterações ao sistema, desde que estas não envolvam uma modificação do dissipador ou uma alteração do seu coeficiente de transferência térmica.

A estrutura do actual CPV pode beneficiar de alterações na sua estrutura. A substituição do adesivo por uma liga de brasagem à base de estanho irá eliminar a necessidade de utilização de parafusos e permitir que a placa de circuitos seja mais simples e pequena. A implementação do processo de brasagem a nível industrial poderá ser possível recorrendo a soldadura por indução magnética ou por microondas, mas serão necessários estudos preliminares para avaliar a qualidade das juntas obtidas. Será também necessário avaliar a resistência à corrosão da estrutura criada.

O protótipo idealizado iria ter um desempenho térmico superior ao actual sistema e permitiria ainda um aproveitamento extra de energia, graças ao dispositivo termoeléctrico. O protótipo construído, apesar de não ter sido o ideal, apresentou uma grande capacidade de escoar calor. Durante o seu funcionamento, para uma potência a dissipar de 55.2W o ΔT medido foi cerca de 60% inferior ao do actual sistema (correspondendo a um aumento de 1,25% da eficiência), conseguindo-se gerar 2.1 mW no dispositivo termoeléctrico. Foi ainda testado para uma potência aplicada de 160W, correspondente a cerca de 125W de calor a dissipar, durante 30 minutos. Ao fim deste tempo a célula apresentava uma temperatura de 69°C. É de notar que 125W de calor a dissipar, corresponde à potência a dissipar quando o sistema opera com rácios de concentração à volta de 1600x.

9. Bibliografia

1. Andreev, A.L.L.V.M., *Concentrator Photovoltaics*. Springer Series In Optical Sciences, ed. Springer. 2007.
2. Sitio: www.magpower.pt/. [10/9/2011]
3. Pérez-Higueras, P., et al., *High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: Present status and forecast*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(4): p. 1810-1815.
4. Clive, F.M.u.R.R.I.S.G.M.B.G.S.B., *Solar Concentrators*. International Journal of Applied Sciences, 2010. **1** (1): p. 15.
5. Dimroth, F., *High-efficiency solar cells from III-V compound semiconductors*. physica status solidi (c), 2006. **3**(3): p. 373-379.
6. Sitio: http://spie.org/Images/Graphics/Newsroom/Imported-2010/003124/003124_10_fig1.jpg. [5/10/2011]
7. Luque, A.M.A., *Next Generation Photovoltaics High efficiency through full spectrum utilization*. Series in Optics and Optoelectronics. 2004: Institute of Physics Publishing.
8. Royne, A., C. Dey, and D. Mills, *Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005. **86**(4): p. 451-483.
9. Lee, S., *Thermal Challenges and Opportunities in Concentrated Photovoltaics*, em *12 th Electronics Packaging Technology Conference*. 2010, IEEE: Singapore.
10. John H. Lienhard IV, J.H.L.V., *A Heat Transfer Textbook*. 4 ed. 2011: Phologiston Press.
11. Cao, M., et al., *Thermal Stress Analysis/Life Prediction of Concentrating Photovoltaic Module*. Journal of Solar Energy Engineering, 2008. **130**(2): p. 021011.
12. Chiang, T.-L.C.Z.-H.S.H.-F.H.C.-N.H.K.-N., *Investigation of the Thermal Performance of High-Concentration Photovoltaic Solar Cell Package*. Electronic Materials and Packaging, 2007: p. 1 - 6.
13. Luth, H.I.I.H., em *Solid-State Physics 4th Edition*, Springer.
14. David Halliday, R.R., Jearl Walker, em *Fundamentals of Physics Extended, 8th Edition*, Wiley.
15. Amagai, M., *Mechanical reliability in electronic packaging*. Microelectronics Reliability, 2002.
16. Kenji Araki, H.U., Masafumi Yamaguchi, *A simple passive cooling structure and its heat analysis for 500x concentrator PV module*. IEEE, 2002.
17. Sun, J., et al., *Modeling and Experimental Evaluation of Passive Heat Sinks for Miniature High-Flux Photovoltaic Concentrators*. Journal of Solar Energy Engineering, 2005. **127**(1): p. 138.
18. Sitio: <http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/CPV/C3MJ%20CDO%20Products%2020100818.pdf>. [10/10/11]
19. Tsai, M.Y., C.H. Chen, and C.S. Kang, *Thermal measurements and analyses of low-cost high-power LED packages and their modules*. Microelectronics Reliability, 2011.
20. Riffat, S., *Thermoelectrics: a review of present and potential applications*. Applied Thermal Engineering, 2003. **23**(8): p. 913-935.

21. Algora, C., *Reliability of III–V concentrator solar cells*. Microelectronics Reliability, 2010. **50**(9-11): p. 1193-1198.
22. Faiman, D., *LARGE-AREA CONCENTRATORS*, em *2nd Workshop on “The path to ultra-high efficient photovoltaics”*. 2002: JRC Ispra, Italy
23. Sítio: <http://www.zenithsolar.com/>. [8/03/2011]
24. Bell, L.E., *Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems*. Science, 2008. **321**(5895): p. 1457-1461.
25. Sítio: <http://www.sigmaaldrich.com/portugal.html>. [11/10/11]
26. Sítio: http://msds.chem.ox.ac.uk/BE/beryllium_oxide.html. [17/09/2011]
27. Falat, T., A. Wymysłowski, and J. Kolbe, *Numerical approach to characterization of thermally conductive adhesives*. Microelectronics Reliability, 2007. **47**(2-3): p. 342-346.
28. Anzel, K.T.R.R.A.T.I., *MULTILAYERED NANO-FOILS FOR LOW-TEMPERATURE METAL-CERAMIC JOINING* Association of Metallurgical Engineers of Serbia 2008. **14**.
29. He, A.D.Z., *METHOD FOR SOLDER BONDING CPV RECEIVER TO HEAT SINK*, em *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE* 2009: Philadelphia, PA
30. Gorbunov, A.A.S.V.V., *COMBUSTION OF NICKEL - ALUMINUM THERMITE* Fizika Goreniya i Vzryva, 1981. **18**: p. 40-42.
31. George S. Brady; Henry R. Clauser, J.A.V., *Materials Handbook* 15 ed. Handbooks: McGraw-Hill.
32. VICENZI, C.H.B.E.P., *Condensed-Phase Modifications in Magnesium Particle Combustion in Air*. Combustion and Flame, 2000.
33. Ahmed, T.J., et al., *Induction welding of thermoplastic composites—an overview*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006. **37**(10): p. 1638-1651.
34. McHenry, A.H.H.M.G.O.K.J.M.R.S.a.M.E., *Novel Solder-Magnetic Particle Composites and Their Reflow Using AC Magnetic Fields*. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 2010. **Vol 46**.
35. Fink, M.N.W.S.U.P.R.J.W.W.K.M.M.M.S.P., *Solder Pastes for Microwave Application*, em *Electronics Systemintegration Technology Conference*, IEEE, Editor. 2006: Dresden, Germany.
36. W. G. Anderson, P.M.D., D. B. Sarraf, and S. Tamanna *Heat Pipe Cooling of Concentrating Photovoltaic Cells* em *Photovoltaic Specialists Conference*, IEEE, Editor. 2008, IEEE: San Diego, CA, USA. p. 1-6.
37. An-Yu Kuo, B.L., C. C. Huang, Jeffrey Chen P.K. Chiang , Shown Shao, Rupert Wu and Ian Lin, *Modular Solar Engine with Solar Cell, Heat Pipe, and Heat Sink in an Integrated Package for High Concentrating Photovoltaic*, em *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 34th IEEE* 2009.
38. Kosmadakis, G., D. Manolakos, and G. Papadakis, *Simulation and economic analysis of a CPV/thermal system coupled with an organic Rankine cycle for increased power generation*. Solar Energy, 2011. **85**(2): p. 308-324.

Anexos

- Procedimento para controlo do processo de soldadura por aluminotermia

Segurança

Durante o processo de ignição da termite deve ser utilizado equipamento de protecção, nomeadamente óculos de soldador, bata e luvas. Não se deve observar a reacção directamente sem óculos com protecção contra UV. Os testes devem ser realizados longe de materiais inflamáveis.

Controlo da velocidade de reacção

Materiais e equipamentos:

- Óxido de níquel (NiO) em pó com granulometria na ordem das dezenas de microns ou inferior
- Alumínio em pó (metálico) com granulometria na ordem das dezenas de microns ou inferior
- Fita de magnésio
- Alumina em pó (Al₂O₃), de preferência com granulometria na ordem dos nanómetros
- Chapa de alumínio
- “Agitador”

Procedimento:

1. Num agitador, misturar os pós de NiO e alumínio metálico num rácio de 4 partes de NiO para 1 de Al (em peso) de modo a obter pelo menos 15 gramas da mistura.
2. Retirar 6 porções de 2 g da mistura inicial.
3. Em 5 das porções retiradas, adicionar 10wt% de alumina a uma delas, 20wt% à segunda, 30wt% à terceira, 40wt% à quarta e 50wt% à quinta. Deixar uma porção sem alumina.
4. Misturar no agitador, individualmente, os pós de cada amostra para homogeneizar a sua constituição, excepto a amostra que não tem alumina.
5. Após misturar os componentes, num local apropriado, colocar a chapa de alumínio.
6. Colocar uma amostra na chapa de alumínio. A primeira amostra deverá ser a amostra sem alumina, para servir de referência.
7. Colocar um pavio de fita de magnésio sobre a amostra
8. Provocar a ignição do pavio
9. Afastar e observar a reacção utilizando óculos de soldador
10. Avaliar qualitativamente a violência da reacção
11. Repetir para todas as amostras

- Processo de soldadura da placa de circuitos

Materiais e equipamentos

- Termite, mistura escolhida de acordo com a experiência anterior
- Dissipador
- Placa de circuitos
- Peso
- Fita de magnésio
- Procedimento

Procedimento

1. Colocar a termite sobre o dissipador de modo a cobrir toda a área a soldar
2. Colocar a placa de circuitos sobre os pós
3. Remover o excesso de pó
4. Colocar o peso sobre a placa de circuitos de modo a que a força seja uniformemente distribuída.
5. Colocar um pouco de fita de magnésio em contacto com a termite
6. Provocar a ignição da fita de magnésio

7. Afastar e esperar pelo fim da reacção

Procedimento para medir a emissividade da célula solar.

1. Ligar o computador e a câmara térmica
2. Retirar as protecções da lente da câmara térmica
3. Ligar a fonte de tensão
4. Ligar o software thermaCAM research pro 2.10 ©
5. Fazer a conexão da câmara ao computador, utilizando o comando Ctrl + L. Seleccionar a câmara na lista que surge após executar este comando.
6. Colocar a placa de circuitos no campo de visão da câmara (preferencialmente no centro)
7. Após a imagem da câmara aparecer no software, utilizar os botões “vela”, “focar automático”, “focar perto”, “focar longe” de modo a obter uma imagem de boa qualidade.
8. Ligar os crocodilos da fonte de tensão aos contactos, ligando o positivo ao contacto traseiro e o negativo ao contacto frontal.
9. Colocar o termopar em contacto com a superfície da célula
10. Aplicar uma potência de 3,21 W (2,2 V e 1,46 A)
11. Esperar que as temperaturas lidas pela câmara e pelo termopar estabilizem
12. Recorrendo ao software, e sabendo a temperatura lida pelo termopar, calcular a emissividade da célula.

Procedimento experimental para caracterização térmica

1. Colocar o CPV no encaixe, utilizando parafusos. Deverá haver um espaçamento entre o cpv e o encaixe, de modo a evitar que o calor se propague para o encaixe.
2. Ligar o computador e a câmara térmica
3. Retirar as protecções da lente da câmara térmica
4. Ligar a fonte de tensão
5. Ligar os crocodilos da fonte de tensão aos contactos, ligando o positivo ao contacto traseiro e o negativo ao contacto frontal.
6. Ligar o software thermaCAM research pro ©
7. Fazer a conexão da câmara ao computador, utilizando o comando Ctrl + L. Seleccionar a câmara na lista que surge após executar este comando.
8. Após a imagem da câmara aparecer no software, utilizar os botões “vela”, “focar automático”, “focar perto”, “focar longe” de modo a obter uma imagem de boa qualidade.
9. Para definir as condições de gravação, clicar em “recording” “conditions” e definir as condições: desligar ao fim de 5h5min, gravar imagem minuto a minuto, seleccionar mostrar imagem, e clicar OK
10. Na fonte de tensão, criar o seguinte programa: nº de passos – 10, tempo de cada passo– 1600 segundos, passo 1 – 10W, passo 2 - 20W,..., passo 10 – 100W.
11. Gravar o programa com um número à escolha
12. No caso de o ensaio ser feito com vento, ligar a ventoinha com a velocidade desejada a 15 cm do cpv
13. Ligar a fonte de tensão
14. Carregar em recall e escolher o número do programa
15. Carregar em start
16. No computador carregar em “start recording” (ícone pistola)
17. Quando o ensaio terminar, fazer o gráfico “variação temperatura vs tempo” e guardar o ficheiro.